

# **Caio Bittencourt Cardoso Felix**

# Avaliação Metrológica de Métodos de Calibração de Transdutores Piezoelétricos de Alta Pressão Aplicados a Ensaios Balísticos de Munições Leves

## Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

> Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa Coorientadora: Khrissy Aracélly Reis Medeiros

> > Rio de Janeiro, fevereiro de 2024



# **Caio Bittencourt Cardoso Felix**

# Avaliação Metrológica de Métodos de Calibração de Transdutores Piezoelétricos de Alta Pressão Aplicados a Ensaios Balísticos de Munições Leves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Metrologia. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

# Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa, Dr.

Orientador Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

## Khrissy Aracélly Reis Medeiros, Dra.

Coorientadora Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

## Prof. Carlos Frederico de Matos Chagas, Dr.

Seção de Ensino de Engenharia Mecânica (SE/4) Instituto Militar de Engenharia (IME)

## Wallace Moreira Herdy, Dr.

Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 21 de fevereiro de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Caio Bittencourt Cardoso Felix**

Formado pela Academia Militar das Agulhas Negras em 2011 e em Engenharia Mecânica e de Armamento pelo Instituto Militar de Engenharia em 2017. As áreas de atual interesse são Metrologia, Balística, Ensaios de munições e Instrumentação. Atualmente mestrando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Felix, Caio Bittencourt Cardoso

Avaliação metrológica de métodos de calibração de transdutores piezoelétricos de alta pressão aplicados a ensaios balísticos de munições leves / Caio Bittencourt Cardoso Felix; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa; coorientadora: Khrissy Aracélly Reis Medeiros. – 2024.

159 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2024.

Inclui bibliografia

 Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Calibração. 5. Ensaios de munições. 6. Medição de pressão transiente. 7. Transdutores piezoelétricos. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Medeiros, Khrissy Aracélly Reis. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

À minha Família, fonte inesgotável do meu amor e gratidão.

## Agradecimentos

À minha esposa, Tuanny, pelo apoio na superação das dificuldades diárias impostas pelos desafios da vida, sem o qual nenhuma conquista seria possível. Obrigado por acreditar nos meus sonhos e por ser o bastião de nossa família.

À minha filha, Marina, por me fazer enxergar o verdadeiro sentido da vida.

Aos meus pais, Rogério e Valéria, pelo apoio incondicional em todas as etapas de minha vida.

Ao meu orientador, Carlos Roberto Hall Barbosa, pelo acompanhamento e o valioso direcionamento ao longo desta jornada acadêmica.

À minha coorientadora, Khrissy Aracélly Reis Medeiros, pela dedicação em contribuir incansavelmente com o sucesso deste trabalho.

Aos professores da PósMQI, em especial aos professores Alcir de Faro Orlando e Élcio Cruz de Oliveira, pelos ensinamentos e pelas inestimáveis contribuições.

Aos funcionários da PósMQI e da PUC-Rio, em especial ao técnico Evêmero Callegario, pelo auxílio nos diversos experimentos realizados na PUC-Rio.

Aos alunos da PósMQI pelo convívio fraterno, em especial ao querido amigo Lucas Aló Rodrigues pela contribuição substancial em parte dos experimentos.

Ao Exército Brasileiro por propiciar esta oportuna experiência enriquecedora.

Ao Centro de Avaliações do Exército, em especial ao Laboratório de Ensaios Balísticos e ao Laboratório de Metrologia, por disponibilizar os meios necessários para os ensaios experimentais. Aos amigos do CAEx que contribuíram com conhecimento fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Coronel Macello Menezes Eifler pelo apoio ao pedido de ingresso no curso de mestrado e pela confiança depositada em mim.

À Companhia Brasileira de Cartuchos por disponibilizar pessoal e equipamentos empregados nas calibrações de transdutores piezoelétricos.

Aos membros da comissão examinadora por suas contribuições a este trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (código de financiamento 001).

## Resumo

Felix, Caio Bittencourt Cardoso; Hall Barbosa, Carlos Roberto (Orientador); Medeiros, Khrissy A. R. (Coorientadora). **Avaliação Metrológica de Métodos de Calibração de Transdutores Piezoelétricos de Alta Pressão Aplicados a Ensaios Balísticos de Munições Leves**, 2023. 159p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os procedimentos de calibração de transdutores piezoelétricos, abordados pela base normativa de ensaios de munições leves, carecem de detalhes cruciais para assegurar a confiabilidade metrológica nas medições de pressão transiente dessas munições leves. Diante deste fato, cabe aos laboratórios, como requisito para a acreditação segundo a norma ISO/IEC 17025:2017, comprovarem a eficácia dos métodos empregados, sobretudo nas calibrações, o que motivou a realização do estudo. A abordagem metodológica baseou-se em pesquisas bibliográficas, documentais, experimentais e de laboratório, visando a coleta de dados conforme as etapas de avaliação dos métodos de calibração. Inicialmente realizou-se a avaliação de certificados de calibração de transdutores piezoelétricos, estudando, sobretudo, as características da regressão linear adotada pela base normativa nos procedimentos de calibração. Nesta etapa, a pesquisa propôs a adoção da incerteza do ajuste como parâmetro principal de avaliação de transdutores piezoelétricos, mostrando sua viabilidade em relação ao erro de linearidade. Em seguida, foi realizada a caracterização e modelagem da cadeia de medição de pressão transiente, composta por transdutor piezoelétrico e amplificador de carga. A modelagem permitiu a simulação de diferentes metodologias de calibração, resultando na previsão de erros, e proporcionando a avaliação da influência do amplificador de carga nas medições de pressão transiente. Por último, foram comparadas duas metodologias distintas de calibração, destacando a importância de sistemas automatizados de calibração para maior confiabilidade metrológica.

## Palavras-chave

Metrologia; Calibração; Ensaios de Munição; Medição de Pressão Transiente; Transdutores Piezoelétricos.

## Abstract

Felix, Caio Bittencourt Cardoso; Hall Barbosa, Carlos Roberto; Medeiros, Khrissy A. R. Metrological Evaluation of Calibration Methods of High Pressure Piezoelectric Transducers Applied to Ballistic Tests of Small Arms Ammunition, 2023. 159p. M.Sc. Dissertation – Postgraduate Program in Metrology, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The calibration procedures of piezoelectric transducers, addressed by the normative basis of small arms ammunition testing, lack crucial details to ensure metrological reliability in the transient pressure measurements of these small arms munitions. In view of this fact, it is up to the laboratories, as a requirement for accreditation according to ISO/IEC 17025:2017 standard, to prove the effectiveness of the methods used, especially in calibrations, which motivated the study. The methodological approach was based on bibliographic, documentary, experimental and laboratory research, aiming at data collection according to the stages of evaluation of calibration methods. Initially, the evaluation of calibration certificates of piezoelectric transducers was carried out, studying, above all, the characteristics of the linear regression adopted by the normative basis in the calibration procedures. At this stage, the research proposed the adoption of fit uncertainty as the main parameter for the evaluation of piezoelectric transducers, showing their feasibility in relation to linearity error. Then, the characterization and modeling of the transient pressure measurement chain, composed of a piezoelectric transducer and a charge amplifier, was performed. The modeling allowed the simulation of different calibration methodologies, resulting in the prediction of errors, and providing the evaluation of the influence of the charge amplifier on transient pressure measurements. Finally, two different calibration methodologies were compared, highlighting the importance of automated calibration systems for greater metrological reliability.

## Keywords

Metrology; Calibration; Ammunition Tests; Transient Pressure Measurement; Piezoelectric Transducer.

# Sumário

Sumário 9
Lista de siglas e abreviaturas 12
Lista de figuras 13
Lista de tabelas 19
1 Introdução 21
1.1. Definição do problema de pesquisa 25
1.2. Motivação 31
1.3. Objetivos: geral e específicos
1.4. Estrutura da dissertação 33
2 Ensaios de pressão em munições leves
2.1. Balística interna 35
2.2. Ensaios de pressão e velocidade 37
2.3. Métodos de medição de pressão 39
2.3.1. Método mecânico por meio de cilindro de cobre 40
2.3.2. Método eletrônico ou eletromecânico por meio de
transdutores piezoelétricos 41
2.3.2.1. Piezoeletricidade
2.3.2.2. Aplicações do efeito piezoelétrico 44
2.3.2.3. Transdutores Piezoelétricos Conformal
2.3.2.4. Transdutores piezoelétricos da série GP 50
2.3.2.5. Cadeia de medição de pressão transiente da balística
interna por meio de transdutores piezoelétricos

2.4. Calibração de transdutores piezoelétricos para medição de	
pressão de munições leves	56
2.4.1. Calibração dinâmica indireta	58
2.4.2. Calibração quase-estática indireta	59
3 Avaliação metrológica de certificados de calibração	62
3.1. Mínimos quadrados com intercepto nulo	62
3.2. Mínimos quadrados com intercepto não nulo	63
3.3. Erro de linearidade	64
3.4. Incerteza do ajuste	64
3.5. Significância do intercepto	71
3.6. Aplicação da avaliação do resultado do ajuste	72
4 Modelagem e simulação da cadeia de medição de pressão	
transiente	74
4.1. Caracterização e modelagem da cadeia de medição	75
4.1.1. Caracterização e modelagem do transdutor piezoelétrico	75
4.1.2. Caracterização e modelagem do amplificador de carga	79
4.1.3. Modelagem da cadeia de medição	84
4.2. Avaliação de métodos de calibração de transdutores	
piezoelétricos baseada em simulação	88
4.2.1. Calibração dinâmica	88
4.2.2. Calibração quase-estática	92
5 Avaliação de métodos de calibração indiretos	96
5.1. Método de calibração dinâmica indireta	96
5.2. Método de calibração quase-estática indireta	98
5.3. Comparação entre os métodos de calibração indireta	99

5.3.1. Resultados da calibração dos transdutores pelo método CDI	100
5.3.2. Resultados da calibração dos transdutores pelo método CQel	101
5.3.3. Análise comparativa entre os métodos de calibração indireta	104
5.4. Checagem da calibração de transdutores	105
5.4.1. Comparação entre os métodos de medição mecânico e	
eletromecânico	107
5.4.2. Resultados	108
6 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	115
Referências bibliográficas	120
Apêndice A – Resultados da avaliação do ajuste em certificados de calibração	126
Apêndice B – Esquemático da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente	127
Anexo A – Artigo Publicado – Sensors 2023	128
Anexo B – Artigo Publicado – CIMMEC – Metrologia 2023	148
Anexo C – Tabela de conversão – Copper crusher Mileq 0905-	
VN1	159

# Lista de siglas e abreviaturas

BVD	Butterworth-Van Dyke
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
CDI	Calibração Dinâmica Indireta
CIP	Comissão Internacional Permanente para Ensaios de Armas Portáteis
CQel	Calibração Quase-estática Indireta
DFPC	Diretoria de Fiscalização de Produtos Controlados
EPVAT	Electronic Pressure, Velocity and Action Time
FFT	Fast Fourrier Transform
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
LEB	Laboratório de Ensaios Balísticos
M-CMOPI	Multi-caliber manual of proof and inspection
MEM	Material de Emprego Militar
NEB/T	Norma Técnica do Exército Brasileiro
NSO	NATO Standardization Office
OAC	Organismo de Avaliação de Conformidade
OTAN	Organização do Tradado do Atlântico Norte
PCE	Produtos Controlados pelo Exército
SAAMi	Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute
SisFPC	Sistema de Fiscalização de Produtos Controlados pelo Exército
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

# Lista de figuras

Figura 1 – Método de medição mecânico: (a) cilindro de cobre
instalado sobre o pistão para a medição de pressão; (b) câmara
da culatra do armamento (Mosin-Nagant Factory Pressure Test
Rifle, 2018)23
Figura 2 – Método de medição eletromecânico: fuzil automático
Imbel IA2 calibre 5,56 mm x 45 mm instrumentado com dois
transdutores piezoelétricos para medição de pressão, instalados
(a) na câmara e; (b) próximo ao final do cano do armamento24
Figura 3 – Exemplificação do comportamento da curva de
pressão da balística interna e as posições correspondentes no
cano (Güngör, 2017)25
Figura 4 – Cadeia de medição de pressão com emprego de
transdutores piezoelétricos: (a) o transdutor piezoelétrico
converte pressão em carga elétrica; (b) o amplificador de carga
converte carga elétrica em tensão elétrica proporcional; (c) o
conversor A/D, por meio da amostragem do sinal analógico, gera
um sinal digital; (d) a informação, por sua vez, é transmitida para
o computador, que a processa, gerando, por exemplo, o
diagrama de pressão por tempo (adaptado de HPI GMBH,
2018)
Figura 5 – Estímulo dos processos de calibração de transdutores
piezoelétricos: degrau negativo inserido nas calibrações (CIP,
2001)
Figura 6 – Munição leve e seus componentes (Kalkomey
Enterprises, LLC, [s.d.])
Figura 7 – Fases do disparo de uma munição (Kalkomey
Enterprises, LLC, [s.d.])

Figura 8 – Aparato experimental: (a) Estativa e; (b) conjunto
receptor e provete. Adaptado de HPI GmbH (2007)
Figura 9 – Provete equipado com dois transdutores
piezoelétricos
Figura 10 – Cronógrafo HPI modelo B472 com distância entre
telas ópticas de 1 m
Figura 11 – Estativa, receptor e provete com sistema de medição
de pressão por cilindro de cobre (Greener, 1899)40
Figura 12 – Método mecânico de medição de pressão,
empregando cilindro de cobre (adaptado de SAVAGE; FREED,
2008)41
Figura 13 – Efeito piezoelétrico direto: (a) cristais de quartzo,
exemplo de materiais piezelétricos; (b) representação molecular
de um cristal de quartzo; (c) cristal de quartzo sob efeito de
carregamento, gerando a polarização; (d) resposta linear do
material piezoelétrico. (adaptado de Kistler Group ([s.d.]))43
Figura 14 – Esquemático das aplicações do efeito piezoelétrico
(Tichý <i>et al.</i> , 2010)45
Figura 15 – Curva experimental de pressão no tempo de uma
munição 7,62 mm x 51 mm NATO, obtida por meio de transdutor
piezoelétrico46
Figura 16 – Transdutor piezoelétrico GP6 (fonte: HPI)47
Figura 17 – Transdutor <i>Conformal</i> e sua vista seccionada
(adaptado de (Change e Riggis, 1976)
Figura 18 – Transdutor PCB 117B44 em contato com estojo de
munição calibre .44 Rem Mag49
Figura 19 – Guia para alinhamento do transdutor Conformal: (a)
montagem do acessório no transdutor; (b) montagem do
conjunto (transdutor com guia) no provete, garantindo o
alinhamento do diafragma inferior com a câmara e,
consequentemente, com a superfície cilíndrica ou troncocônica
do estojo (PCB Piezotronics, 2015)49
Figura 20 – Provete com eventos nas posições da boca do estojo
e na " <i>port pressure</i> "51

Figura 21 – Dependência das constantes de sensibilidade piezoelétrica do quartzo e do fosfato de gálio com a variação da temperatura (Krempl, 1997). .....51 Figura 22 – Transdutores instalados na mesma câmara: (a) de medição direta e; (b) Conformal (Lally e Metz, 2001)......52 Figura 23 - Modelo elétrico Butterworth-Van Dyke de Figura 24 - Topologia típica de amplificadores de carga (Jung, 2002; Oven, 2014; Laurila et al., 2019; Alnasser, 2020)......54 Figura 25 – Cadeia de medição de pressão da balística interna: (a) o transdutor piezoelétrico converte pressão em carga elétrica; (b) o sistema HPI B217 transforma carga elétrica em tensão elétrica por meio do amplificador de carga, passando pelo conversor A/D; (c) a informação é transmitida para o computador, que processa a informação recebida, gerando, por exemplo, o diagrama de pressão por tempo (HPI Gmbh, 2018)......55 Figura 26 – Exemplo esquemático do peso morto: (a) a pressão padrão é gerada por meio das massas padronizadas apoiadas sobre o pistão; (b) o reservatório mantém o sistema hidráulico com fluído suficiente; a partir do apoio das massas correspondentes à pressão desejada; (c) o pistão regulador é ajustado de modo que o pistão que sustenta as massas flutue sobre o cilindro hidráulico; a partir da estabilização da pressão no sistema; (d) a válvula é aberta, inserindo no caso, um degrau positivo na linha de pressão onde; (e) o transdutor piezoelétrico Figura 27 – Bomba de calibração comparativa: (a) o primeiro reservatório é pressurizado com a pressão desejada para a calibração; (b) o transdutor de referência e; (c) o transdutor em calibração são instalados em; (d) um reservatório de menor volume; após a estabilização da pressão; (e) a válvula instalada entre os reservatórios é aberta, inserindo, no caso, um degrau 

Figura 28 – Aplicação dos métodos de calibração aos diferentes	
tipos de transdutores piezoelétricos	58
Figura 29 – Representação gráfica característica da CDI	59
Figura 30 – Representação gráfica característica da CQel	60
Figura 31 - Resultado da simulação gerado pelo Matlab: dados	
correspondentes à simulação de calibração com 50 ciclos e 7	
níveis de pressão	68
Figura 32 – Resultado das simulações de calibração compostas	
de 1 a 50 ciclo: (a) incerteza da sensibilidade; (b) incerteza do	
ajuste	69
Figura 33 – Histograma dos resíduos gerados na simulação para	
a determinação de incerteza do ajuste equivalente ao limite do	
erro de linearidade de 1 %, no caso do transdutor HPI GP6	70
Figura 34 – Diagrama representando regiões de aceitação e	
rejeição para o Teste t	72
Figura 35 - Comparativo entre os resultados para o erro de	
linearidade e a incerteza do ajuste	73
Figura 36 – Modelo elétrico adotado para a cadeia de medição	
de pressão transiente	75
Figura 37 – FFT de uma curva de pressão no tempo	
característica de uma medição de pressão de munição	77
Figura 38 – Circuito Auto-Balancing Bridge Method empregado	
na análise de impedância do transdutor piezoelétrico HPI GP6	
(adaptado de Keysight Technologies (2016))	77
Figura 39 – Análise de impedância do transdutor HPI GP6	
empregando: (a) o analisador de impedância Keysight E4900A;	
(b) o circuito de conexão Auto-Balancing Bridge Method; (c)	
conectado ao transdutor piezoelétrico	78
Figura 40 – Resultado do ajuste dos dados para o modelo BVD:	
(a) resistência e; b) reatância	79
Figura 41 – Topologia do amplificador de carga: composição das	
impedâncias de entrada (Z1) e de realimentação (Z2)	80
Figura 42 – Entrada em tensão gerada pelo HPI B202 para a	
caracterização do amplificador de carga HPI B217	81

Figura 43 – Circuito empregado na caracterização do
amplificador de carga81
Figura 44 – Instrumentos usados na caracterização conectados
em série: (a) gerador de função HPI B202; (b) capacitor de
referência; (c) amplificador de carga HPI B217 e; (d)
osciloscópio82
Figura 45 – Esquemático do método de ajuste utilizado para a
modelagem do amplificador de carga83
Figura 46 – Resultados do ajuste, apresentados para cada
capacitor de referência84
Figura 47 – Circuito da cadeia de medição de pressão transiente
composta por transdutor piezoelétrico e amplificador de carga85
Figura 48 – Esquemático do método de ajuste utilizado para o
refinamento dos parâmetros da cadeia de medição de pressão
dinâmica
Figura 49 – Resultado do ajuste realizado, por meio dos dados
experimentais, para o refinamento dos parâmetros, e o erro
calculado
Figura 50 – Erro obtido com a etapa final da modelagem da
cadeia de medição de pressão transiente87
Figura 51 – Sinais de entrada para a simulação de calibração
dinâmica
Figura 52 – Respostas do modelo da cadeia de medição de
pressão transiente mediante a entrada de degraus de pressão
Figura 53 – Resposta da simulação do degrau negativo de
pressão com duração de 5,493 ms, com a constante de tempo
( $\tau$ ) do amplificador de carga de 274,655 ms91
Figura 54 – Respostas para as simulações de calibração quase-
estática, com degrau de pressão positivo entre 0 e 600 MPa94
Figura 55 – TMS K9905D: equipamento destinado à calibração
de transdutores piezoelétricos (The Modal Shop, Inc., 2016)97
Figura 56 – Equipamento de calibração de transdutores HPI
B630 com: (a) o transdutor de referência e; (b) o transdutor em
calibração instalados no cilindro hidráulico

Figura 58 – Curva de calibração do transdutor HPI GP6 6795102
Figura 59 – Curva de calibração do transdutor HPI GP6 6931102
Figura 60 – Erro de linearidade para cada medição de pressão
no método CDI103
Figura 61 – Erro de linearidade para cada medição de pressão
no método CQel103
Figura 62 – Sistema empregado nas medições simultâneas de
pressão: (a) instalação sistema de medição mecânica por
cilindro de cobre ( <i>copper crusher</i> ) e; (b) instalação do transdutor
piezoelétrico HPI GP6108
Figura 63 – Comparação entre pressão medida por cilindro de
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI
GP6 6336, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos
métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,
respectivamente111
Figura 64 – Comparação entre pressão medida por cilindro de
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelosmétodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,respectivamente.112Figura 65 – Comparação entre pressão medida por cilindro decobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6931, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelosmétodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,respectivamente.112Figura 65 – Comparação entre pressão medida por cilindro decobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6931, com as diferentes sensibilidades determinadas pelosmétodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelosmétodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,respectivamente.112Figura 65 – Comparação entre pressão medida por cilindro decobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPIGP6 6931, com as diferentes sensibilidades determinadas pelosmétodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,respectivamente.112
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI   GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos   métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,   respectivamente. 112   Figura 65 – Comparação entre pressão medida por cilindro de   cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI   GP6 6931, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos   métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original,   respectivamente. 112   Figura 66 – Fluxograma do processo de calibração de
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente
cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Constantes de tempo no intervalo $0 < t < 0,02\tau$ , para
um limite de erro de 2 % 59
Tabela 2 – Níveis de pressão de referência para um ciclo de
calibração para o transdutor HPI GP667
Tabela 3 – Resultado da simulação 70
Tabela 4 – Parâmetros do transdutor piezoelétrico HPI GP6
determinados com a modelagem
Tabela 5 – Capacitâncias dos quatro capacitores de referência
usados na caracterização do amplificador de carga 82
Tabela 6 – Parâmetros do amplificador de carga HPI B217
determinados com a modelagem 84
Tabela 7 – Parâmetros do modelo elétrico da cadeia de medição
de pressão transiente
Tabela 8 – Duração dos degraus negativos de pressão
simulados com o modelo elétrico da cadeia de medição, e os
correspondentes valores para a constante k 89
Tabela 9 – Resultado das simulações de calibração dinâmica
para o modelo de transdutor piezoelétrico HPI GP6 e
amplificador de carga HPI B217 90
Tabela 10 – Características dos amplificadores de carga
habilitados às medições quase-estáticas de carga elétrica
Tabela 11 – Parâmetros do amplificador de carga variados na
simulação de calibração quase-estática
Tabela 12 – Resultado da simulação de calibração quase-
estática
Tabela 13 – Transdutores utilizados na comparação entre os
métodos100
Tabela 14 – Resultado da calibração pelo método da CDI100

Tabela 15 – Resultado da calibração pelo método CQel. .....101 Tabela 16 – Sensibilidades piezoelétricas de cada transdutor utilizado na comparação entre métodos de medição. .....107 Tabela 17 – Resultado das medições simultâneas de pressão na câmara empregando o cilindro de cobre e o transdutor piezoelétrico HPI GP6 6336, com as respectivas diferenças percentuais relativa à medição por cilindro de cobre......109 Tabela 18 – Resultado das medições simultâneas de pressão na câmara empregando o cilindro de cobre e o transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as respectivas diferenças percentuais relativa à medição por cilindro de cobre......109 Tabela 19 – Resultado das medições simultâneas de pressão na câmara empregando o cilindro de cobre e o transdutor piezoelétrico HPI GP6 6931, com as respectivas diferenças percentuais relativa à medição por cilindro de cobre......110 Tabela 21 – Incerteza do ajuste considerando a regressão linear entre os valores de pressão obtidos pelos métodos mecânico, por cilindro de cobre, e eletrônico, por transdutor piezoelétrico, além do percentual considerando fundo de escala de 600 MPa do transdutor......113 Tabela 22 – Resultado de avaliação do ajuste em certificados de calibração para transdutores HPI GP6 e GP2.....126

# Introdução

O Exército Brasileiro tem a competência de autorizar e fiscalizar a produção e a comercialização de materiais bélicos, incumbência delegada pelo Decreto nº 24.602, de 06 de julho de 1934 (Brasil, 1934). Em virtude da complexidade das atividades de fiscalização, que compreendem a fabricação, importação, exportação, desembaraço alfandegário, comercialização e tráfego, cabe à Diretoria de Fiscalização de Produtos Controlados pelo Exército (DFPC) gerenciar o Sistema de Fiscalização de Produtos Controlados pelo Exército (SisFPC), responsável por regulamentar, fiscalizar e autorizar as atividades de pessoas físicas e jurídicas referentes ao trabalho com Produtos Controlados pelo Exército (PCE).

Conforme definido pelo Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019 (Brasil, 2019), um PCE é todo material que "apresenta poder destrutivo, propriedade que possa causar danos às pessoas ou ao patrimônio ou indicação de necessidade de restrição de uso por motivo de incolumidade pública", além dos materiais de interesse militar. Portanto, são exemplos de PCE armas de fogo, acessórios de armas de fogo, munições, explosivos, propelentes, artifícios pirotécnicos, blindagens e proteções balísticas.

A autorização para a fabricação e comercialização de PCE se dá mediante avaliação da conformidade do protótipo, sendo os requisitos mínimos de segurança e desempenho estabelecidos pelo Comando do Exército por meio da publicação de Norma Técnica do Exército Brasileiro (NEB/T) ou pela adoção de normas publicadas por organizações normalizadoras reconhecidas internacionalmente.

A certificação de PCE é realizada por Organismos de Avaliação da Conformidade (OAC), designados pelo Comando do Exército. Até o ano de 2019, o Centro de Avaliações do Exército (CAEx) era a única instituição responsável pela certificação de PCE. O Laboratório de Ensaios Balísticos (LEB) do CAEx possui capacidade técnica e infraestrutura para realizar os ensaios em armamentos e munições leves, até o calibre .50 (12,7 mm x 99 NATO), além de materiais de proteção, tais como: blindagens corporais e blindagens balísticas. A

avaliação da conformidade de PCE garante a qualidade dos materiais bélicos fabricados pela indústria nacional, preservando, principalmente, a segurança dos usuários finais.

Particularmente, as munições leves, ou munições para armamentos leves, podem ser definidas como aquelas destinadas ao uso em pistolas, fuzis, submetralhadoras, fuzis de assalto e metralhadoras leves (Exército Brasileiro, 1970). No que se refere aos ensaios de munições leves, a base normativa, além de assegurar a repetibilidade e a uniformidade dos ensaios, proporciona a intercambialidade de acordo com o calibre dos produtos. Nas avaliações de protótipos de munições leves, em geral, são realizados ensaios metrológicos dimensionais, inspeções visuais, ensaios de funcionamento, precisão, pressão e velocidade, entre outros, a depender da norma adotada, do calibre especificado, além do tipo de projétil e da aplicação, que determinarão a necessidade de execução de ensaios complementares.

Quanto às organizações normalizadoras, destacam-se a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), em inglês, *"North Atlantic Treaty Organization"* (NATO), a Comissão Internacional Permanente para Ensaios de Armas Portáteis (CIP), e a *"Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute"* (SAAMI), traduzida como Instituto dos Fabricantes de Armas e Munições Esportivas.

A OTAN, essencialmente, é uma aliança militar que constitui um sistema de defesa coletiva. Por meio da *"NATO Standardization Office"* (NSO), a organização realiza atividades de normalização que visam à padronização de métodos de ensaios, equipamentos e inspeções, além de determinar os requisitos de desempenho, com o objetivo de garantir a intercambialidade entre materiais bélicos adotados pelos países membros. Para armas e munições leves, a OTAN adota a Edição A de outubro de 2020 da norma AEP-97 – *"Multi-caliber manual of proof and inspection (M-CMOPI) for NATO small arms and ammunition"* (NSO, 2020), composta por 27 (vinte e sete) volumes que padronizam os ensaios e inspeções, além dos requisitos mínimos, para as munições leves adotadas pela OTAN (i.e., calibres 4,6 mm x 30 mm; 5,56 mm x 45 mm; 5,7 mm x 28 mm; 7,62 mm x 51 mm; 9 mm x 19 mm e 12,7 mm x 99 mm)

A CIP é a organização europeia responsável por normalizar os ensaios de armas de fogo e munições, além de padronizar os calibres para munições leves, para os países membros, quais sejam: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chile, Emirados Árabes, Eslováquia, Espanha, Finlândia, França, Grã-Bretanha, Hungria, Itália, República Tcheca e Rússia. Finalmente, a SAAMI cria normas voltadas para os fabricantes associados, visando garantir a intercambialidade dos diversos calibres, entre munições e armamentos, a confiabilidade dos produtos, a qualidade e a segurança.

Dentre os ensaios que as três organizações padronizam com as respectivas normas, o de pressão e velocidade é obrigatório no processo de certificação de munições leves. Este ensaio tem como principal objetivo determinar a pressão máxima desenvolvida na balística interna, fase entre a percussão da munição e a saída do projétil pela boca do cano, além da velocidade final do projétil neste processo. A determinação da pressão máxima visa garantir a segurança do sistema munição, armamento e atirador, além de servir de parâmetro para o desenvolvimento de munições ou armamentos.

Para a medição de pressão, existem dois processos distintos: o método mecânico e o método eletromecânico ou eletrônico.

O método mecânico (Figura 1) emprega um cilindro de cobre (chamado de copper crusher) e um pistão, posicionados no ponto de medição de pressão desejado. Resumidamente, no método mecânico o funcionamento do sistema ocorre por meio da compressão do cilindro de cobre pelo pistão, à medida que a pressão interna aumenta. A pressão máxima desenvolvida no ponto de medição será inversamente proporcional ao comprimento final do cilindro de cobre, sendo determinada por meio de tabelas de conversão. A CIP e a SAAMI permitem a utilização deste método para a medição da pressão máxima.



Figura 1 – Método de medição mecânico: (a) cilindro de cobre instalado sobre o pistão para a medição de pressão; (b) câmara da culatra do armamento (Mosin-Nagant Factory Pressure Test Rifle, 2018).

O segundo método, denominado eletromecânico ou eletrônico, emprega transdutores piezoelétricos de pressão, como exemplificado na Figura 2, a qual destaca a medição de pressão empregando transdutores piezoelétricos HPI GP6 em um fuzil automático Imbel IA2 calibre 5,56 mm x 45 mm.



Figura 2 – Método de medição eletromecânico: fuzil automático Imbel IA2 calibre 5,56 mm x 45 mm instrumentado com dois transdutores piezoelétricos para medição de pressão, instalados (a) na câmara e; (b) próximo ao final do cano do armamento.

Entre 1935 e 1960, os fabricantes de munição desenvolviam seus próprios transdutores piezoelétricos, aplicando este princípio de medição no desenvolvimento de novos produtos (Meier, Engeler e Metz, 2000). Em 1971, a OTAN aprovou o primeiro transdutor piezoelétrico a ser utilizado em avaliações de conformidade de munições, o modelo 6203, fabricado pela Kistler.

A norma AEP-97 da OTAN determina que as medições de pressão realizadas eletronicamente devem empregar os transdutores piezoelétricos GP2 e GP6, comercializados pela empresa HPI, ou os transdutores 6215, fabricados pela Kistler (NSO, 2020). A CIP não determina modelo, tampouco o fabricante. Na verdade, a CIP delimita os requisitos a que os transdutores piezoelétricos devem atender necessariamente, sabendo-se que os transdutores de pressão HPI GP6 e Kistler 6215 atendem às especificações da comissão europeia.

Por outro lado, nas normas publicadas pela SAAMI, os transdutores piezoelétricos padronizados são os da série 117B, também conhecidos como *Conformal*, fabricados pela empresa PCB Piezotronics. Vale ressaltar que a associação permite a utilização de transdutor equivalente, entretanto, não há no mercado transdutor piezoelétrico que utilize o método de medição empregado pelos modelos 117B da PCB Piezotronics.

Comparativamente, uma das vantagens do método eletrônico sobre o mecânico é a possibilidade de medição da pressão durante toda a balística interna, em detrimento de apenas a pressão máxima obtida (Coghe e Elkarous, 2013). A curva de pressão ao longo do tempo, por exemplo, viabiliza a determinação da energia gerada pela queima do propelente, disponível para o funcionamento dos mecanismos de armamentos semiautomáticos e/ou automáticos.

Outra utilidade da medição de pressão é a determinação do perfil de pressão no cano, visando ao projeto de tubos de armamentos (Carlucci e Jacobson, 2018), conforme exemplificado na Figura 3, que ilustra a pressão gerada por uma determinada munição nos pontos correspondentes em um cano de armamento.



Figura 3 – Exemplificação do comportamento da curva de pressão da balística interna e as posições correspondentes no cano (Güngör, 2017).

Finalmente, a medição de pressão é etapa essencial no desenvolvimento e na avaliação da conformidade de munições civis e militares. A relevância dos ensaios de pressão de munições respalda a necessidade de aprimoramento dos métodos de calibração de transdutores piezoelétricos.

### 1.1.

### Definição do problema de pesquisa

No Brasil, o CAEx é o responsável pela avaliação da conformidade de munições leves que podem ser classificadas como PCE, isto é, quando se permite

a comercialização ao público civil autorizado a utilizá-las, ou como Material de Emprego Militar (MEM), quando empregadas exclusivamente pelas Forças Armadas do Brasil.

De modo geral, a crescente demanda por PCE e a constante necessidade de aprimoramento dos MEM corrobora a importância de estudos sobre os métodos de medição e calibração utilizados nas avaliações da conformidade dos materiais bélicos.

Atualmente, entidades como OTAN, CIP e SAAMI adotam os transdutores piezoelétricos como principal recurso de medição de pressão na balística interna em munições leves, sabendo-se que a característica que habilita este tipo de transdutor para tal aplicação é a capacidade de medição de elevadas pressões transientes, adequada à medição do fenômeno da balística interna, que produz cerca de 400 MPa de pressão máxima e tem duração aproximada de 1,3 ms, entre a ignição do propelente, a elevação da pressão ao nível máximo e a despressurização até o nível atmosférico. Os elevados patamares do mensurando, que varia subitamente em curtos períodos, são desafios para os processos de calibração dos transdutores piezoelétricos.

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM, um transdutor é um "dispositivo que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada" (Inmetro, 2012). No caso dos transdutores piezoelétricos de pressão, a grandeza de entrada é pressão, originada de uma força sobre uma determinada área, e a grandeza de saída é a carga elétrica, geralmente medida em picocoulombs (pC). A carga elétrica é originada do efeito piezoelétrico direto, fenômeno característico de cristais piezoelétricos que, quando comprimidos e deformados, geram cargas elétricas proporcionais ao esforço mecânico (Arnau e Soares, 2008).

Para medições com transdutores de pressão piezoelétricos, se faz necessária a utilização de instrumentação específica. Os amplificadores de carga são comumente empregados (Gautschi, 2002), convertendo a carga elétrica originada pelo efeito piezoelétrico em tensão elétrica proporcional a esta, medida em volts (V) (Pallas, 2012), permitindo a leitura por meio de condicionadores de sinais, tais como osciloscópios e conversores analógico/digital (A/D).

Portanto, em qualquer medição de pressão com emprego de transdutores piezoelétricos, seja ela em ensaios ou calibrações, se faz necessária a cadeia de medição descrita na Figura 4, viabilizando a conversão de carga elétrica em tensão elétrica por intermédio de um amplificador de carga e a subsequente aquisição de dados com o uso de um conversor A/D ou osciloscópio.



Figura 4 – Cadeia de medição de pressão com emprego de transdutores piezoelétricos: (a) o transdutor piezoelétrico converte pressão em carga elétrica; (b) o amplificador de carga converte carga elétrica em tensão elétrica proporcional a esta; (c) o conversor A/D, por meio da amostragem do sinal analógico, gera um sinal digital; (d) a informação, por sua vez, é transmitida para o computador, que a processa, gerando, por exemplo, o diagrama de pressão por tempo (adaptado de HPI GMBH, 2018).

Para a medição de pressão, é necessário conhecer a relação entre a pressão aplicada (grandeza de entrada) e a carga elétrica gerada (grandeza de saída), isto é, a sensibilidade do transdutor piezoelétrico, que pode ser dada em pC/bar, pC/MPa ou pC/psi, por exemplo. Conhecendo-se a sensibilidade do transdutor por meio da calibração, é possível obter uma curva de pressão no tempo processada por um computador, por exemplo, concluindo a cadeia de medição.

Segundo o VIM (2012), uma calibração consiste na "operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação". O documento estabelece ainda que a calibração é a garantia documentada da relação entre o resultado de uma medição e uma referência, por meio de uma cadeia ininterrupta, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.

A "International Laboratory Accreditation Cooperation" (ILAC), organização internacional de organismos de acreditação, caracteriza a rastreabilidade com os seguintes elementos essenciais (ILAC, 1994):

- a) Cadeia de rastreabilidade: uma cadeia ininterrupta de comparações que remonta a um padrão aceitável para as partes, geralmente um padrão nacional ou internacional;
- b) Incerteza de medição: a incerteza de medição para cada etapa da cadeia de rastreabilidade deve ser calculada de acordo com métodos definidos e deve ser declarada de modo que uma incerteza global para toda a cadeia possa ser calculada;

- c) Documentação: cada etapa da cadeia deve ser executada de acordo com procedimentos documentados e geralmente reconhecidos; os resultados devem igualmente ser documentados;
- d) Competência: os laboratórios ou organismos que executam uma ou mais etapas da cadeia devem fornecer provas da sua competência técnica (por exemplo, demonstrando que são acreditados);
- e) Referência às unidades SI: os padrões "apropriados" devem ser padrões primários para a realização das unidades SI; e
- f) Recalibrações: as calibrações devem ser repetidas em intervalos apropriados; a duração destes intervalos depende de uma série de variáveis (por exemplo, incerteza necessária, frequência de uso, modo de uso, estabilidade do equipamento).

No caso dos ensaios balísticos de pressão, a demanda por medições com baixa incerteza de medição esbarra na inexistência de rastreabilidade nos métodos de calibração de transdutores de pressão transiente (não acústica) (Hjelmgren, 2002; Eichstädt, Esward e Schäfer, 2015; Salminen *et al.*, 2018). A calibração rastreável, exigência para a garantia da qualidade em laboratórios acreditados pela ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017), gera a necessidade de adaptação dos métodos de calibração disponíveis para os instrumentos de medição de pressão estática invariante no tempo (Eichstädt, Esward e Schäfer, 2015), como por exemplo, o peso morto (calibração direta) e a bomba comparativa (calibração indireta), que possuem padrão rastreável, violando assim os elementos essenciais (a) e (e).

Quanto às adaptações mencionadas, para viabilizar a calibração de transdutores piezoelétricos, vocacionados para a medição de pressão transiente, após a obtenção do nível de pressão desejado, a carga elétrica é medida enquanto uma válvula é aberta rapidamente, por exemplo, caracterizando um degrau de pressão negativo (Hjelmgren, 2002). A Figura 5 ilustra o degrau de pressão negativo, "evento dinâmico" inserido nos processos de calibração com peso morto ou bomba comparativa.



Figura 5 – Estímulo dos processos de calibração de transdutores piezoelétricos: degrau negativo inserido nas calibrações (CIP, 2001).

Outro fator limitador refere-se à falta de normalização de procedimentos de calibração de pressão transiente, inclusive no que diz respeito à determinação da incerteza de medição (Eichstädt, Esward e Schäfer, 2015; Theodoro *et al.*, 2016), violando também os elementos (c) e (d).

Além disso, no Brasil, não existem laboratórios de calibração acreditados com capacidade de atender às necessidades de laboratórios de ensaios balísticos no que tange à rastreabilidade de transdutores piezoelétricos de pressão. Diante deste cenário, a aquisição de equipamentos dedicados à calibração de transdutores piezoelétricos se torna um facilitador para os laboratórios de ensaios, uma vez que os procedimentos de calibração podem ser realizados no mesmo laboratório onde os ensaios ocorrem, reduzindo o tempo e o custo de calibração. Cabe ressaltar que, neste caso, o laboratório deve atender aos requisitos da qualidade da norma ISO/IEC 17025:2017 no que concerne à execução de calibração, ou seja, comprovar a rastreabilidade, determinando inclusive a incerteza de medição da calibração.

Por outro lado, a simples aquisição de equipamentos dedicados à calibração de transdutores piezoelétricos pode não ser suficiente para a garantia da qualidade, caso as condições de execução do procedimento comprometam o resultado da calibração, descaracterizando a eficiência e a conformidade com a base normativa. Desta forma, caberá ao laboratório atestar que as condições de utilização do equipamento de calibração equivalem às especificadas pela base normativa e pelo fabricante, garantindo assim que a calibração seja isenta de vícios e erros de medição.

De modo geral, as três organizações normalizadoras definem os procedimentos de calibração de transdutores piezoelétricos, objetivando a padronização dos processos relacionados aos ensaios de pressão. Os métodos normalizados do peso morto e da bomba comparativa são comumente utilizados na calibração dos transdutores usados em ensaios balísticos. Qualquer que seja o método adotado, sabe-se que o objetivo principal da calibração é determinar a sensibilidade de um transdutor piezoelétrico. Portanto, todos os processos de calibração consistem na medição das cargas elétricas, por meio da cadeia de medição ilustrada na Figura 4, gerada com a aplicação de diferentes patamares de pressão, permitindo o ajuste de uma reta que contenha necessariamente a origem, cujo coeficiente angular corresponderá à sensibilidade do transdutor. A partir daí, a avaliação da condição do transdutor se dará por meio do erro de linearidade, que é a máxima diferença absoluta entre os pontos de calibração e a curva de ajuste, expresso em percentual sobre a faixa de medição (Gautschi, 2002). Tal método não considera qualquer cálculo de incerteza de medição, seja ela relacionada diretamente às características do transdutor piezoelétrico em calibração, ou até mesmo associada aos processos ou os equipamentos envolvidos.

Aliás, a avaliação da incerteza de medição, outro requisito da norma ISO/IEC 17025:2017, é outro fator limitador, visto que, conforme já mencionado, não há normalização relacionada ao cálculo de incerteza em processos de calibração de transdutores de pressão transiente.

Diante do exposto, e considerando-se que os processos de calibração não reproduzem com exatidão o fenômeno da balística interna, insere-se o problema desta pesquisa:

 Como os métodos de calibração e avaliação metrológica de transdutores piezoelétricos de alta pressão contribuem para o atendimento aos requisitos normativos aplicáveis a ensaios balísticos de munições leves?

Esta indagação é acompanhada por outras questões a serem respondidas ao longo desta pesquisa, a saber:

- Quais são os diferentes métodos de calibração de transdutores piezoelétricos adotados por laboratórios de ensaios de munições?
- Como a instrumentação inserida na cadeia de medição de carga elétrica influencia as medições de pressão por transdutores piezoelétricos, bem como a calibração destes instrumentos?
- O método de avaliação de transdutores piezoelétricos balísticos via erro de linearidade do ajuste atende às necessidades dos laboratórios de ensaios, no que se diz respeito às exigências normativas?

 A calibração de transdutores piezoelétricos apresenta resultados semelhantes empregando-se diferentes métodos?

# 1.2.

### Motivação

A crescente demanda por armas e munições leves, seja por atiradores civis ou Forças Armadas, ao redor do mundo, contribui para o desenvolvimento e aprimoramento das atividades relacionadas à produção e comercialização destes materiais. No caso específico de munições leves, seja no processo de inovação ou na garantia da qualidade, os fabricantes necessitam ter a capacidade técnica de realizar ensaios balísticos que visem à medição dos parâmetros mínimos necessários que garantam a qualidade de desempenho e segurança dos produtos. Além disso, a avaliação da conformidade é essencial para a verificação do atendimento aos requisitos estabelecidos por normas e regulamentos técnicos, estabelecidos, neste caso, pelas organizações OTAN, CIP e SAAMI.

O CAEx tem a missão de realizar a avaliação da conformidade de materiais de interesse do Exército Brasileiro e de materiais cuja autorização para a comercialização e utilização dependem do mesmo, os PCE. A vocação do LEB é executar ensaios diversos em munições leves, necessários à certificação destes materiais, além de realizar ensaios balísticos em materiais de proteção e armamentos leves.

Para a realização dos ensaios, em consonância com os requisitos contidos na norma ISO/IEC 17025:2017, é necessário que o LEB realize a seleção, a verificação e a validação dos métodos e procedimentos relacionados a todas as atividades do laboratório, sejam elas em ensaios ou calibrações. Desta forma, no que tange à avaliação da conformidade de munições leves, particularmente nos ensaios de pressão de munições leves, os estudos sobre os métodos de medição de pressão e de calibração dos transdutores piezoelétricos são fundamentais para a garantia da confiabilidade metrológica.

As principais normas para a avaliação da conformidade de munições leves, isto é, aquelas publicadas pelas organizações OTAN, CIP e SAAMI, não caracterizam o processo como um todo, ou seja, o evento dinâmico inserido no processo de medição por meio do transdutor piezoelétrico, tampouco as características da instrumentação empregada nos processos de calibração e medição, como, por exemplo, a constante de tempo dos amplificadores de carga. Sendo assim, cabe aos laboratórios comprovarem e demonstrarem a eficácia dos métodos empregados nos processos de medição de pressão e na calibração de transdutores piezoelétricos.

Portanto, acredita-se que esta pesquisa contribuirá sobremaneira para a caracterização dos métodos relacionados à medição de pressão oriunda da balística interna de munições leves, por meio de transdutores piezoelétricos de alta pressão.

### 1.3.

### **Objetivos: geral e específicos**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar metrologicamente os métodos de calibração de transdutores piezoelétricos de alta pressão aplicados a ensaios balísticos de munições leves, visando atender aos requisitos normativos aplicáveis a ensaios balísticos de munições leves e garantir a confiabilidade metrológica destes processos.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Estudar os diferentes métodos de calibração de transdutores piezoelétricos, definidos pela base normativa de munições leves;
- Propor diferentes métodos de qualificação/avaliação de transdutores piezoelétricos, alternativos ao adotado pela base normativa de ensaios de munições leves, com base em parâmetros que compõem o cálculo da incerteza de medição;
- Estudar a viabilidade da utilização da incerteza do ajuste no processo de qualificação/avaliação de transdutores piezoelétricos, em substituição ao erro de linearidade;
- Modelar a cadeia de medição de pressão transiente (transdutor piezoelétrico e amplificador de carga);
- Estudar a influência da duração do evento dinâmico, ou seja, da variação de pressão, no processo de calibração de transdutores piezoelétricos por meio de simulação;
- Avaliar a influência da instrumentação empregada na calibração de transdutores piezoelétricos por meio de simulação;
- Comparar por meio de análise da incerteza do ajuste os resultados de diferentes métodos de calibração de transdutores piezoelétricos;

- Avaliar as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de calibração de transdutores piezoelétricos em relação à garantia da confiabilidade metrológica dos ensaios de pressão; e
- Estudar a viabilidade de procedimento de checagem da cadeia de medição de pressão transiente em munições leves, garantindo o atendimento aos requisitos impostos pela norma ISO/IEC 17025:2017.

#### 1.4.

#### Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, descritos a seguir.

O presente capítulo 1 apresentou uma contextualização sobre o assunto abordado, a definição do problema de pesquisa e a descrição dos objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 trata dos ensaios de pressão em munições leves, abordando conceitos fundamentais sobre balística, os ensaios normalizados de pressão, as características dos transdutores piezoelétricos, a instrumentação que compõe a cadeia de medição de carga elétrica de transdutores de pressão piezoelétricos, além dos métodos de calibração de transdutores piezoelétricos.

O capítulo 3 versa sobre a avaliação metrológica de certificados de calibração, com foco no estudo sobre as características do ajuste por mínimos quadrados que resulta na sensibilidade piezoelétrica dos transdutores. Neste capítulo propõe-se a metodologia de análise do certificado de calibração.

O quarto capítulo apresenta a caracterização e modelagem de dois componentes da cadeia de medição de pressão dinâmica: o transdutor piezoelétrico e o amplificador de carga. Um modelo elétrico foi construído com o objetivo de viabilizar simulações de calibração de transdutores piezoelétricos, permitindo o estudo sobre a influência das variações nas características das curvas de pressão transiente em calibrações dinâmicas, assim como na avaliação da influência da configuração de amplificadores de carga nas calibrações quaseestáticas.

Uma comparação entre métodos de calibração distintos é relatada no capítulo 5, com enfoque na identificação das principais características que podem influenciar na confiabilidade metrológica dos processos de calibração, além de apresentar os resultados baseados nos estudos sobre a incerteza do ajuste.

Finalmente, são apresentadas as conclusões, destacando os pontos relevantes deste trabalho, suas contribuições para a área de conhecimento, além das sugestões para trabalhos futuros.

# Ensaios de pressão em munições leves

### 2.1.

#### **Balística interna**

Balística é a ciência com foco no estudo da propulsão de um projétil, em sua trajetória e nos efeitos ocasionados com o seu impacto contra um alvo. Ela é subdividida em balística interna, balística externa e balística terminal. A balística interna estuda a aceleração do projétil em uma arma e os processos relacionados. Já na balística externa, o foco principal é a trajetória do projétil, desde a saída do armamento até o instante em que ele atinge um alvo. Por fim, a balística terminal estuda os efeitos do projétil quando ele atinge e penetra em um alvo (Kneubuehl, 2011).

Para o entendimento da balística, é fundamental o estudo da munição, que proporcionará o desenvolvimento de todas as fases da balística, a partir do disparo do armamento.

As munições leves, são empregadas em armas de porte, ou seja, revólveres e pistolas semiautomáticas, e em armas portáteis, no caso de metralhadoras e fuzis. Qualquer que seja o tipo de armamento, sempre existirá um sistema de disparo, responsável pelo acionamento da espoleta, uma câmara da culatra ou câmara, que acondicionará a munição completa antes do disparo e resistirá aos níveis mais elevados de pressão após a ignição da carga principal e, por fim, um tubo ou cano com calibre específico por onde o projétil se deslocará até a sua passagem pelo orifício de saída, a boca.

A composição tradicional de munições leves se resume a quatro itens, detalhados na Figura 6: espoleta, carga propelente, estojo e projétil.



Figura 6 – Munição leve e seus componentes (Kalkomey Enterprises, LLC, [s.d.]).

O foco principal do conjunto de componentes da munição é a propulsão do projétil, que inicialmente estará engastado na região anterior do estojo. A propulsão é garantida por meio de um trem explosivo composto por uma espoleta e pela carga propelente. A espoleta nada mais é que um misto explosivo sensível cuja principal função é, mediante o acionamento pelo sistema de disparo do armamento, iniciar a deflagração da carga propelente. A combustão desta última proporcionará a expansão gasosa no interior da câmara da culatra e no tubo, originando uma força no culote do projétil que, inicialmente engastado na boca do estojo, iniciará a translação até a sua saída pela boca do tubo, com a velocidade inicial da balística externa sendo denominada velocidade de boca.

A Figura 7 ilustra cada fase entre o disparo da munição e a saída do projétil pela boca, descrito da seguinte forma:

 a) Com o armamento carregado, a munição encontra-se alojada na câmara da culatra, localizada entre o sistema de disparo e o tubo raiado. Inicialmente, o percussor do armamento encontra-se armado, comprimindo a mola de percussão;

b) No instante em que ocorre o disparo por meio do acionamento do gatilho do armamento, a mola é distendida, fazendo com que o percussor livre atinja a espoleta instalada no culote da munição, iniciando a queima da carga propelente contida no interior do estojo da munição; e

c) A combustão do propelente produz a expansão gasosa, originando uma força no culote do projétil, suficiente para desengastá-lo do estojo da munição e deslocá-lo ao longo do tubo do armamento, até que o mesmo saia pela boca do tubo.



Figura 7 – Fases do disparo de uma munição (Kalkomey Enterprises, LLC, [s.d.]).
O objeto de estudo da balística interna é desenvolver uma carga propulsora que entregue a velocidade inicial desejada para o projétil, sem danos à arma por excesso de pressão e com alta probabilidade de que cargas sucessivas impulsionando os mesmos projéteis produzirão resultados semelhantes (Carlucci e Jacobson, 2018). Portanto, a velocidade de saída do projétil pela boca do tubo do armamento e o perfil de pressão no tempo e ao longo do tubo do armamento são parâmetros relevantes para a caracterização da balística interna.

2.2.

#### Ensaios de pressão e velocidade

O principal interesse da balística interna é que a carga propelente de uma munição forneça energia suficiente para produzir uma determinada velocidade de boca, sem que pressões excessivas prejudiquem a segurança do atirador, bem como a integridade e a funcionalidade do armamento. Portanto, conhecer o perfil de pressão e a velocidade de boca, tanto para o projeto de armas quanto de munições, é tema relevante na ciência da balística.

Sendo assim, no caso de munições leves, ensaios de pressão e velocidade são realizados, em regra, nos processos de certificação de munições, previstos, por exemplo, na base normativa das organizações civis CIP e SAAMI e pela aliança militar OTAN. A OTAN denomina o ensaio como *Electronic Pressure, Velocity and Action Time* (EPVAT), compreendendo a medição de pressão interna, velocidade de boca e o tempo de ação - tempo compreendido entre o contato do percussor com a espoleta e a saída do projétil pela boca.

Quanto aos instrumentos de medição, o tempo de ação pode ser medido por meio de sensores de contato, no instante do disparo da munição, e por um transdutor piezoelétrico instalado na boca do tubo. Toda essa instrumentação necessita ser instalada no sistema que realizará o disparo da munição e que fará parte do desenvolvimento da balística interna. Este, inclusive, corresponde a um dos motivos para o emprego de equipamento específico para ensaios, diferentemente de armamentos comuns.

Em ensaios balísticos, utiliza-se aparato experimental composto em geral por estativa, receptor e provete, ilustrados na Figura 8:

 a) Denomina-se estativa a base fixa que possui suporte para instalação do receptor e detém mecanismos de controle de direção e elevação de tiro, além de sistema de recuo e amortecimento de disparo;  b) O receptor contém sistema de disparo compatível com a instrumentação necessária à medição do tempo de ação, bloco de trancamento capaz de suportar as elevadas pressões desenvolvidas na balística interna e mecanismos de ajuste e montagem dos provetes; e

c) Os provetes são tubos com calibre específico e medidas normalizadas, destinados à realização de ensaios balísticos em geral. Por serem destinados ao uso em laboratórios, em ensaios de protótipos de munições, eles possuem margem de segurança superior a tubos instalados em armamentos, ou seja, devem suportar pressões superiores às desenvolvidas por munições comerciais.



Figura 8 – Aparato experimental: (a) Estativa e; (b) conjunto receptor e provete. Adaptado de HPI GmbH (2007).

No caso de ensaios de pressão e velocidade, o provete empregado deve possuir orifícios destinados à instalação dos instrumentos de medição de pressão, podendo ser sistema de medição por cilindro de cobre (método mecânico), ou por transdutores piezoelétricos (método eletrônico). A Figura 9 mostra um provete de pressão com transdutores piezoelétricos instalados em dois orifícios.



Figura 9 – Provete equipado com dois transdutores piezoelétricos.

Por fim, a velocidade de boca pode ser medida utilizando-se cronógrafos, compostos por telas ópticas de início e fim da contagem do tempo. A primeira tela óptica deve ser posicionada com um certo afastamento da boca do provete e a segunda tela óptica fixada a uma determinada distância da primeira definida pela base normativa empregada. O instrumento mede o tempo em que o projétil leva para cruzar as telas ópticas. A Figura 10 mostra um cronógrafo destinado ao uso em ensaios balísticos.



Figura 10 – Cronógrafo HPI modelo B472 com distância entre telas ópticas de 1 m.

# 2.3.

## Métodos de medição de pressão

A literatura destaca que existem três métodos experimentais de medição de pressão originada da balística interna: (i) por meio de cilindro de cobre, o método mecânico; (ii) por meio de transdutores piezoelétricos, o método eletrônico ou eletromecânico; e (iii) por meio de extensômetros (*strain gauges*) (Dimeff, Carson e Charters, 1955; Brownell *et al.*, 1965; Flynn, 1970; Vattaparambil Sreedharan *et al.*, 2023). Este trabalho investiga apenas os métodos mecânico e eletrônico, os quais tem previsão na base normativa de ensaios balísticos (CIP, 2001; SAAMI, 2015; NSO, 2020).

# 2.3.1. Método mecânico por meio de cilindro de cobre

O método de medição mecânico, por meio de cilindro de cobre, é o método de medição de pressão da balística interna experimental mais antigo, proposto por Noble em 1868 (Krynitsky, 1921). A Figura 11 mostra um aparato do século XIX, composto por estativa, receptor e provete, utilizado nos primórdios da medição de pressão da balística interna por meio de cilindro de cobre.



The Crusher Gauge.

Figura 11 – Estativa, receptor e provete com sistema de medição de pressão por cilindro de cobre (Greener, 1899).

Quanto às características e ao funcionamento, a Figura 12 mostra detalhadamente os componentes do sistema de medição de pressão mecânico.



Figura 12 – Método mecânico de medição de pressão, empregando cilindro de cobre (adaptado de SAVAGE; FREED, 2008).

Neste tipo de sistema, a medição da pressão interna da munição instalada na câmara (a) acontece por meio do cilindro de cobre (b), que é instalado entre o pistão (c) e o batente (d). O batente é ajustado pelo parafuso (e) para manter contato entre o cilindro, o pistão e o obturador (f). Quando a munição é disparada ocorre a queima do propelente no interior do estojo (g), o gás flui através do orifício (h), empurrando o pistão, que por sua vez comprime o cilindro de cobre. A deformação plástica do cilindro corresponderá à pressão máxima desenvolvida na balística interna, sendo determinada por meio de tabelas de conversão disponibilizadas pelo fabricante.

A medição por cilindro de cobre (*copper crusher*) é um método prático e fornece de forma rápida a pressão máxima desenvolvida por uma munição, sem a necessidade de qualquer instrumentação eletrônica. No entanto, os estudos de Coghe e Elkarous (2013) e Zahid et al. (2017) mostram que as medições por cilindro de cobre fornecem medidas de pressão inferiores à pressão medida por transdutores piezoelétricos, justificadas pelo comportamento dinâmico do cilindro de cobre.

# 2.3.2.

# Método eletrônico ou eletromecânico por meio de transdutores piezoelétricos

Um sensor é um elemento diretamente afetado por um determinado fenômeno, corpo ou substância que contém o mensurando, isto é, a grandeza que

se deseja medir (Inmetro, 2012). Eles podem ser classificados como passivos ou ativos (Gautschi, 2002). Sensores passivos, diferentemente dos ativos, necessitam da aplicação de uma energia externa para que apresentem sua resposta em função do mensurando.

Os extensômetros, por exemplo, apresentam variação de resistência em função de um esforço aplicado, sendo necessária a aplicação de corrente elétrica para a medição da grandeza. Desta forma, eles podem ser classificados como sensores passivos. Por outro lado, sensores piezoelétricos apresentam características ativas, uma vez que, ao serem submetidos a esforços mecânicos, produzem carga elétrica que pode ser medida diretamente, sem necessidade de aplicação de energia externa.

# 2.3.2.1.

#### Piezoeletricidade

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por Pierre Curie e Jacques Curie (Curie e Curie, 1880). Entretanto, sua primeira aplicação como sensor foi explorada somente em 1919, por J. J. Thomson, ao publicar que cristais de turmalina ou de quartzo poderiam ser empregados em medições de pressão oriundas de explosões (Thomson, 1919).

O efeito piezoelétrico pode ser classificado como direto ou inverso. O efeito piezoelétrico direto é descrito por Gautschi (2002) como a mudança proporcional da polarização elétrica de um material submetido a uma deformação, isto é, o material piezoelétrico, ao sofrer um esforço mecânico, gera uma carga elétrica proporcional a sua deformação. Por outro lado, o efeito piezoelétrico reverso ocorre quando a aplicação de campo elétrico em materiais piezoelétricos resulta na criação de tensões mecânicas e consequentes deformações.

A Figura 13 resume o efeito piezoelétrico direto em cristais de quartzo (SiO<sub>2</sub>). Conforme a ilustração, os cristais piezoelétricos de quartzo, a partir da aplicação de um determinado esforço mecânico, representado pela força externa ( $F_x$ ), sofrem uma mudança na polarização em nível molecular, resultando no aparecimento de um campo elétrico proporcional ao esforço mecânico aplicado. Quando cessa a aplicação da força, a polarização é revertida para o estado inicial, interrompendo o campo elétrico criado.



Figura 13 – Efeito piezoelétrico direto: (a) cristais de quartzo, exemplo de materiais piezelétricos; (b) representação molecular de um cristal de quartzo; (c) cristal de quartzo sob efeito de carregamento, gerando a polarização; (d) resposta linear do material piezoelétrico. (adaptado de Kistler Group ([s.d.])).

De acordo com a teoria linear da piezoeletricidade (ANSI e IEEE, 1988), para o efeito direto, a densidade da carga elétrica gerada em materiais piezoelétricos é proporcional ao esforço mecânico aplicado. Sendo assim, a primeira relação é dada por

$$D = d \cdot T \tag{1}$$

onde *D* é o deslocamento elétrico (C·m<sup>-2</sup>), *d* é a sensibilidade piezoelétrica, expresso em C·N<sup>-1</sup> e *T* representa a tensão mecânica, cuja unidade é N·m<sup>-2</sup>.

Além do efeito do esforço mecânico, para os materiais piezoelétricos é necessário considerar o efeito gerado pelo campo elétrico *E*, medido em V·m<sup>-1</sup>, cuja relação com o deslocamento elétrico define a constante dielétrica do cristal piezoelétrico, sob esforço mecânico constante,  $\varepsilon^{T}$ , expresso em C·V<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>:

$$D = \varepsilon^{\mathrm{T}} \cdot E \tag{2}$$

Portanto, para o efeito piezoelétrico direto, considerando os efeitos do esforço mecânico e do campo elétrico, a relação constitutiva dos materiais piezoelétricos é dada por

$$D = d \cdot T + \varepsilon^{\mathrm{T}} \cdot E \tag{3}$$

As propriedades piezoelétricas dependem do sentido e da direção de aplicação. Desse modo, o deslocamento elétrico, o esforço mecânico e o campo elétrico são denotados por vetores e a sensibilidade piezoelétrica e a constante dielétrica são expressas em tensores. Adotando a notação tridimensional, a relação constitutiva dos materiais piezoelétricos, aplicada aos transdutores, passa a ser escrita da seguinte forma:

$$D_i = d_{ij} \times T_j + \varepsilon_{ii}^T \times E_i \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & \varepsilon_{12}^T & \varepsilon_{13}^T \\ \varepsilon_{21}^T & \varepsilon_{22}^T & \varepsilon_{23}^T \\ \varepsilon_{31}^T & \varepsilon_{32}^T & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Segundo Tichý et al. (2010), para o efeito piezoelétrico direto, admite-se que o campo elétrico *E* é constante e nulo. Com isso, o efeito piezoelétrico direto para os transdutores passa a ser descrito pela seguinte equação:

$$D_i = d_{ij} \cdot T_j \tag{5}$$

A razão entre o campo elétrico produzido e o esforço mecânico aplicado é denominado coeficiente de tensão piezoelétrica g, cuja unidade é V·m·N<sup>-1</sup>. Segundo Tichý et al. (2010), esta razão descreve o efeito piezoelétrico. O coeficiente é calculado pela razão entre a sensibilidade piezoelétrica e a constante dielétrica. Assim como as constantes  $d \in \varepsilon$ , a constante g depende da direção de aplicação.

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon_{ij}^T} \tag{6}$$

No caso do efeito piezoelétrico inverso, a relação constitutiva será dada por

$$S_i = s_{ij}^E \cdot T_j + d_{ij}^* \cdot E_j, \tag{7}$$

onde  $S_j$  é o vetor deformação, gerado pela soma dos efeitos relacionados à tensão  $T_j$ , multiplicada pelo coeficiente de deformação piezoelétrico  $s_{ij}^E$ , e dos efeitos do campo elétrico  $E_j$ , multiplicado pelo coeficiente piezoelétrico  $d_{ij}^*$ . É importante ressaltar que  $d_{ij}$  e  $d_{ij}^*$  recebem a denominação de constante piezoelétrica, porém, elas têm unidades diferentes, que são C·N<sup>-1</sup> e m·V<sup>-1</sup>, respectivamente.

# 2.3.2.2.

# Aplicações do efeito piezoelétrico

Materiais piezoelétricos podem ser utilizados como atuadores, pelo efeito piezoelétrico inverso, ou como sensores, empregando o efeito direto. Por meio do efeito piezoelétrico inverso, os materiais piezoelétricos podem ser empregados como osciladores, padrões de referência de frequência e tempo, filtros, sensores ultrassônicos, atuadores e sensores de ressonância. Por meio do efeito direto, os materiais piezelétricos têm utilidade em sensores mecânicos e como geradores de tensão (Tichý *et al.*, 2010). A Figura 14 destaca as diferentes áreas de aplicação do efeito piezoelétrico, subdividindo-as de acordo com o tipo de efeito empregado, isto é, direto e inverso.



Figura 14 – Esquemático das aplicações do efeito piezoelétrico (Tichý et al., 2010).

Empregando o efeito direto, os materiais piezoelétricos podem ser aplicados como transdutores de força e torque, de tensão, de pressão, de aceleração, entre outros (Gautschi, 2002). Os transdutores de pressão são aplicados na indústria bélica para a medição de pressão de munições. Além da variação da pressão relacionada à velocidade de queima do propelente, a variação do volume interno causado pelo deslocamento do projétil no interior do tubo faz com que a pressão a ser medida varie com o tempo, com duração do fenômeno na ordem de 1,3 ms. A Figura 15 exemplifica a curva de pressão da balística interna no tempo, característica de uma munição 7,62 mm x 51 mm NATO.



Figura 15 – Curva experimental de pressão no tempo de uma munição 7,62 mm x 51 mm NATO, obtida por meio de transdutor piezoelétrico.

Os transdutores piezoelétricos usados em ensaios balísticos são classificados como transdutores de alta pressão, isto é, destinam-se à medição de pressões superiores a 100 MPa (14,503 kpsi) (Gautschi, 2002). Eles geralmente apresentam composição semelhante, variando apenas alguns elementos, dentre eles o material piezoelétrico.

Os sensores de alta pressão são constituídos pelo elemento piezoelétrico, como quartzo ou fosfato de gálio, eletrodos, elementos de pré-carga, revestimento e conector (Gautschi, 2002). O elemento piezoelétrico é usualmente inserido e montado no revestimento do transdutor com uma pré-carga, com o objetivo de, além de garantir um bom acoplamento, eliminar possíveis lacunas e frestas que influenciariam na linearidade do transdutor. A pré-carga mantém o material piezoelétrico comprimido, contribuindo também com o prolongamento de sua vida útil (Alciatore, 2007).

O eletrodo interliga e transmite a carga elétrica originada do efeito piezoelétrico do elemento sensível ao conector, geralmente coaxial. O revestimento do transdutor piezoelétrico tem a função de garantir e preservar a montagem original do transdutor e seus componentes, além de protegê-los contra as influências do ambiente de operação.

Para ensaios normalizados de munição leve, em que a pressão oriunda da balística interna é um dos parâmetros a serem medidos, podem ser empregados transdutores de alta pressão PCB *Conformal* ou HPI GP6. A Figura 16 mostra o

modelo seccionado do transdutor GP6, cujo elemento piezoelétrico é o fosfato de gálio (GaPO<sub>4</sub>), fabricado pela empresa High Pressure Instrumentation (HPI).



Figura 16 – Transdutor piezoelétrico GP6 (fonte: HPI).

Os elementos que constituem o transdutor têm, em conjunto, a função de garantir que a carga gerada pelo elemento sensível, a partir da aplicação do esforço, seja transmitida com eficiência ao sistema de aquisição de dados. A carga elétrica (Q) originada do efeito piezoelétrico direto, para ser transformada em medida de pressão, necessita ser convertida por meio da multiplicação pelo fator de sensibilidade do transdutor (d [pC·MPa<sup>-1</sup>]), obtido por meio de calibração. A sensibilidade é a relação entre a resposta do transdutor, ou seja, carga elétrica, e a pressão correspondente. Portanto, para a conversão da carga elétrica (Q) em pressão (P), aplica-se a seguinte equação:

$$P = \frac{Q}{d} \tag{8}$$

No caso dos transdutores de alta pressão PCB Conformal ou HPI GP6 supracitados, ambos apresentam a mesma funcionalidade, ou seja, converter pressão em carga elétrica, por meio do fator d de sensibilidade do transdutor, sendo que a sua aplicabilidade depende da norma adotada.

# 2.3.2.3.

# Transdutores Piezoelétricos Conformal

Os transdutores piezoelétricos de alta pressão do tipo *conformal* são aplicados em ensaios de munições leves que seguem as normas publicadas pela SAAMI (SAAMI, 2015). Estes modelos empregam cristais de quartzo sintéticos como elemento piezoelétrico. Conforme Change e Riggis (1976), eles são compostos por dois cristais conectados eletricamente em paralelo. Um eletrodo conecta a face superior do cristal inferior com a face inferior do cristal superior. Este último apesenta um furo central por onde passa o eletrodo, interligando o elemento piezoelétrico ao conector coaxial. A Figura 17 mostra o transdutor *conformal* B117, bem como sua vista seccionada.



Figura 17 - Transdutor conformal e sua vista seccionada (adaptado de Change e Riggis (1976)).

Os transdutores *conformal* convertem o esforço mecânico aplicado ao diafragma inferior em carga elétrica. O aumento da pressão no interior da câmara, ocasionado pela queima da carga propelente, promove a dilatação do estojo da munição. Este, por sua vez, em contato com o transdutor piezoelétrico, transmite ao diafragma o esforço mecânico que, por consequência, comprime os cristais de quartzo localizados em seu interior, produzindo carga elétrica pelo efeito piezoelétrico direto.

Dado que o diafragma inferior necessita estar em contato com a superfície do estojo da munição, o mesmo possui o formato cilíndrico com raio de curvatura igual ao deste último. A Figura 18 demonstra o contato que o transdutor *conformal*, montado no provete de calibre correspondente, deve ter com o estojo.



Figura 18 – Transdutor PCB 117B44 em contato com estojo de munição calibre .44 Rem Mag.

Para garantir o alinhamento da curvatura do diafragma inferior com a superfície do estojo, o transdutor *conformal* dispõe de um acessório guia para seu alinhamento, destacado na Figura 19. O dispositivo é montado junto ao transdutor e ao provete, facilitando o alinhamento do diafragma inferior com a face interna da câmara do provete.



Figura 19 – Guia para alinhamento do transdutor *conformal*: (a) montagem do acessório no transdutor; (b) montagem do conjunto (transdutor com guia) no provete, garantindo o alinhamento do diafragma inferior com a câmara e, consequentemente, com a superfície cilíndrica ou troncocônica do estojo (PCB Piezotronics, 2015).

Este transdutor permite realizar a medição a partir da dilatação do estojo da munição, conforme descrito em PCB Piezotronics (2015). Tipicamente, durante

a calibração, em baixas pressões, o transdutor *conformal* apresenta resposta muito pequena devido à lacuna entre ele e a superfície do estojo, que ocorre invariavelmente, mesmo que a montagem seja realizada conforme o procedimento apresentado no manual de operação. Assim, à medida que o estojo dilata e elimina o referido espaço, o transdutor apresenta resposta linear.

Com isso, o transdutor *conformal* traduz o esforço mecânico ocasionado pela dilatação do estojo em uma estimativa da pressão, de modo que a composição do material que constitui o estojo da munição ensaiada influenciará nas medições. E, portanto, alcançada a pressão máxima, o estojo sofrerá deformação permanente, que ocasionará no surgimento de uma pressão residual. Vale ressaltar que, quanto maior for a dureza do estojo da munição ensaiada, maior será a incerteza de medição do transdutor (Elkarous *et al.*, 2013).

Metrologicamente, o transdutor PCB 117B para munições leves apresenta fundo de escala de 414 MPa, com sensibilidade de 21 pC/MPa. A pressão máxima admitida, isto é, a pressão limite que não ocasiona deformação permanente no elemento piezoelétrico, é de 552 MPa. Além disso, apresenta polaridade negativa, bem como frequência de ressonância superior a 300 kHz e capacitância de 5 pF.

#### 2.3.2.4.

#### Transdutores piezoelétricos da série GP

Para os ensaios de munições, os transdutores de alta pressão da série GP possuem dois modelos, classificados de acordo com sua faixa de medição: HPI GP2 e HPI GP6, com fundo de escala de, respectivamente, 200 MPa e 600 MPa. O transdutor HPI GP6 é empregado nas medições de pressão na câmara dos provetes (*chamber*), para ensaios segundo a CIP (CIP, 2001), ou na posição correspondente à boca do estojo (*case mouth*), para ensaios segundo a OTAN (NSO, 2020).

Já os transdutores HPI GP2 podem ser empregados nos ensaios de munições a serem certificadas pela OTAN, especificamente para os calibres 5,56 mm x 45 mm e 7,62 mm x 51 mm. Esse modelo deve ser instalado em posição intermediária do provete (*port pressure*). É importante ressaltar que a OTAN não prevê a utilização do sensor HPI GP2, porém trata-se de uma alternativa mais econômica do que o sensor HPI GP6. A Figura 20 ilustra um provete que possui um evento localizado na região da boca do estojo e outro na posição intermediária.



Figura 20 - Provete com eventos nas posições da boca do estojo e na "port pressure".

O material piezoelétrico dos transdutores da série GP é o fosfato de gálio (GaPO<sub>4</sub>), cristal piezoelétrico sintético derivado do quartzo. O material possui constante piezoelétrica de 4,5 pC/N, aproximadamente o dobro do valor da constante para o quartzo, demostrando maior sensibilidade para aplicação em sensores de pressão, força ou aceleração (Krempl, 1994).

Além de maior sensibilidade piezoelétrica, o fosfato de gálio não apresenta variação da constante até a temperatura de 500 °C, demonstrando ser um material indicado para aplicações em elevadas temperaturas (Krempl, 1997).

A Figura 21 mostra graficamente a dependência das constantes de sensibilidade piezoelétrica do quartzo e do fosfato de gálio com a variação da temperatura. Comparativamente, o fosfato de gálio possui menor dependência do que o quartzo, apresentando pequena variação até 700 °C.



Figura 21 – Dependência das constantes de sensibilidade piezoelétrica do quartzo e do fosfato de gálio com a variação da temperatura (Krempl, 1997).

Os transdutores HPI GP2 e HPI GP6, diferentemente dos *conformal*, medem a pressão interna diretamente. No que se refere à medição da *port* 

pressure realizada pelo HPI GP2 e da pressão na boca do estojo realizada pelo HPI GP6, para o emprego dos sensores basta que sejam instalados nos eventos correspondentes empregando torque de 20 N·m. No que tange à medição da pressão na câmara, caso específico para os ensaios segundo a CIP, além do torque de montagem, faz-se necessário realizar a furação do estojo da munição ensaiada. O correto alinhamento do furo do estojo com o evento de instalação do transdutor pode ser obtido empregando-se gabaritos de furação para os diferentes calibres.

Na Figura 22, pode-se observar a instalação de dois transdutores de modelos e especificações diferentes em uma única câmara, de modo a tentar ilustrar a diferença entre o transdutor de medição direta de pressão e o *conformal*. O primeiro (Figura 22a) mede a pressão interna oriunda da queima do propelente pelo orifício alinhado ao furo no estojo de latão, diferentemente do segundo (Figura 22b), que, em contato com o estojo, medirá a pressão por meio de sua expansão.



Figura 22 – Transdutores instalados na mesma câmara: (a) de medição direta e; (b) Conformal (Lally e Metz, 2001).

### 2.3.2.5.

# Cadeia de medição de pressão transiente da balística interna por meio de transdutores piezoelétricos

Como já mencionado, os transdutores piezoelétricos são indicados para realizar as medições de pressão geradas na balística interna (Bilgiç e Durgut, 2015), que têm comportamento dinâmico, com duração aproximada de 1,3 ms. Materiais piezoelétricos como o quartzo e o fosfato de gálio geram carga elétrica somente quando forças são aplicadas ou removidas de suas superfícies. Portanto, a aplicação de forças estáticas em transdutores piezoelétricos gera cargas iniciais, no instante da perturbação mecânica, porém estas são dissipadas e retornam à condição inicial, cessando a produção de carga elétrica, mesmo que o esforço de compressão no transdutor, gerado pela pressão interna, se mantenha constante (Watikins, 2005). Consequentemente, os transdutores piezoelétricos não são indicados para medição de pressão estática invariante no tempo.

Neste sentido, em termos de modelagem da cadeia de medição de pressão transiente, os transdutores piezoelétricos, que possuem comportamento ativo, podem ser representados segundo o modelo denominado Butterworth-Van Dyke (BVD), recomendado pela IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE Std 176-1987) (ANSI e IEEE, 1988), apresentado na Figura 23.



Figura 23 – Modelo elétrico Butterworth-Van Dyke de transdutores piezoelétricos.

De acordo com Zhang et. al. (2008), o modelo BVD é útil para a análise do desempenho elétrico de transdutores piezoelétricos, podendo ser utilizado no projeto e otimização de dispositivos piezoelétricos (Alkhfaji e Garvey, 2010; Zhong e Lam, 2015). Basicamente, o circuito consiste em um resistor, um indutor e um capacitor em série ( $R_m$ ,  $L_m$ ,  $C_m$ ), que modelam a oscilação mecânica do transdutor, todos conectados em paralelo com um segundo capacitor ( $C_0$ ), que domina a impedância do transdutor fora da região de ressonância, modelando a capacitância dielétrica dos elementos piezoelétricos do transdutor e a capacitância parasita dos cabos (Stutzer *et al.*, 2023).

A carga gerada pelo efeito piezoelétrico é medida na unidade coulomb (C), definida no Sistema Internacional de Unidades como a quantidade de eletricidade transportada em 1 s por uma corrente de 1 A. No caso dos transdutores piezoelétricos usados em ensaios balísticos, a carga elétrica produzida encontrase na ordem de pC. Para a medição, os instrumentos comumente usados em instrumentação em geral são capazes de ler corrente ou tensão, sendo incomum a medição de carga elétrica diretamente. Para isso, utilizam-se amplificadores de carga, que têm a função de, mediante a entrada de carga elétrica, fornecer tensão proporcional em faixa capaz de ser medida por um conversor analógico-digital ou osciloscópio. Portanto, uma das funções dos amplificadores de carga é transformar carga elétrica em tensão elétrica.

Amplificadores de carga têm a topologia típica baseada em circuito integrador, apresentada na Figura 24.



Figura 24 - Topologia típica de amplificadores de carga (Jung, 2002; Oven, 2014; Laurila *et al.*, 2019; Alnasser, 2020).

Em termos práticos, quando uma pressão é aplicada ao transdutor, os pulsos de carga elétrica são integrados pela capacitância de realimentação ( $C_f$ ), produzindo a saída como pulsos de tensão ( $E_0(t)$ ). Como a resistência de realimentação ( $R_f$ ) está conectada em paralelo à capacitância de realimentação, a saída se transforma em pulsos de tensão que lentamente descarregam, com a constante de tempo determinada por  $\tau = C_f R_f$ .

Com isso, definem-se dois parâmetros relevantes na seleção de amplificadores de carga: o ganho e a constante de tempo. O ganho  $G_c$  [V/pC] define a relação entre a tensão de saída do amplificador de carga e a carga elétrica de entrada, conforme

$$G_c = \frac{V_{out}}{Q_{in}} \tag{9}$$

A constante de tempo, por sua vez, tem relação direta com as características dinâmicas do fenômeno a ser medido, devendo ser levada em consideração de acordo com a duração da medição de pressão, seja ela em

ensaio ou calibração. O limite para o tempo de duração das medições de carga pode ser definido no intervalo  $0 < t < 0,02\tau$ , para um limite de erro de 2 %, por exemplo (Gautschi, 2002).

Outra característica dos amplificadores é o *drift* (Pallas, 2012), fenômeno definido como tensão elétrica indesejada na saída de um circuito sobre um período de tempo, que não apresenta relação com o mensurando (ISA e ANSI, 1982; Gautschi, 2002). Alguns amplificadores de carga, inclusive, possuem compensadores automáticos de *drift*, como por exemplo o B217 *Data Recorder*, fabricado pela empresa HPI. O sistema de compensação controla o *drift*, mantendo a corrente nula na entrada do amplificador até o momento da medição do sistema, quando é desligado (HPI Gmbh, 2018).

Esquematicamente, a cadeia de medição necessária para a medição de pressão transiente por meio de transdutores piezoelétricos é exemplificada na Figura 25.



Figura 25 – Cadeia de medição de pressão da balística interna: (a) o transdutor piezoelétrico converte pressão em carga elétrica; (b) o sistema HPI B217 transforma carga elétrica em tensão elétrica por meio do amplificador de carga, passando pelo conversor A/D; (c) a informação é transmitida para o computador, que processa a informação recebida, gerando, por exemplo, o diagrama de pressão por tempo (HPI Gmbh, 2018).

Sintetizando, a pressão oriunda da balística interna é convertida em carga elétrica pelo transdutor piezoelétrico HPI GP6. A carga é condicionada pelo amplificador de carga HPI B217, sendo convertida em tensão elétrica. Por fim, um sistema de aquisição processa a saída da cadeia de medição e armazena as informações geradas pela cadeia de medição.

# Calibração de transdutores piezoelétricos para medição de pressão de munições leves

Apesar de apresentarem soluções semelhantes quanto à calibração de transdutores piezoelétricos, cada uma das três organizações que definem a base normativa para ensaios de pressão de munições leves determina os processos de calibração que podem ser empregados de forma particular.

A calibração direta, que atende aos requisitos da OTAN e da CIP, utiliza o sistema de peso morto, em que a pressão gerada é originada pelo apoio de massas padronizadas sobre um pistão. Este tipo de equipamento é comumente empregado na calibração de instrumentos de medição de pressão estática invariante no tempo. A Figura 26 demonstra o peso morto e o seu funcionamento.



Figura 26 – Exemplo esquemático do peso morto: (a) a pressão padrão é gerada por meio de massas padronizadas apoiadas sobre o pistão; (b) o reservatório mantém o sistema hidráulico com fluido suficiente, a partir do apoio das massas correspondentes à pressão desejada; (c) o pistão regulador é ajustado de modo que o pistão que sustenta as massas flutue sobre o cilindro hidráulico, a partir da estabilização da pressão no sistema; (d) a válvula é aberta, inserindo, no caso, um degrau positivo na linha de pressão onde; (e) o transdutor piezoelétrico está conectado e, por sua vez, medirá a pressão transiente.

Por outro lado, a calibração indireta emprega transdutores de referência para medir a pressão originada por um determinado método, servindo de dado de entrada para o cálculo da sensibilidade do transdutor piezoelétrico em calibração. A CIP define como método indireto a bomba de calibração comparativa, equipamento que produz pressão a partir da compressão de um cilindro por ação manual ou automática, no qual se emprega um transdutor de referência na

# 2.4.

determinação da pressão obtida (CIP, 2001). A Figura 27 ilustra o esquema de funcionamento da bomba de calibração comparativa.



Figura 27 – Bomba de calibração comparativa: (a) o primeiro reservatório é pressurizado com a pressão desejada para a calibração; (b) o transdutor de referência e; (c) o transdutor em calibração são instalados em; (d) um reservatório de menor volume; após a estabilização da pressão; (e) a válvula instalada entre os reservatórios é aberta, inserindo, no caso, um degrau de pressão positivo a ser medido pelos dois transdutores.

Assim como na calibração direta por peso morto, este tipo de equipamento, usado na calibração de instrumentos de medição de pressão estática invariante no tempo, necessita da inserção de um evento dinâmico para proporcionar a medição de pressão por transdutores piezoelétricos, conforme ilustrado na Figura 5.

Quanto à classificação dos transdutores, na norma CIP os transdutores piezoelétricos são classificados como padrão, de referência e de uso corrente. Os transdutores padrão devem ser calibrados pelo método direto, por laboratórios de calibração acreditados. Os transdutores de referência devem ser calibrados empregando-se o método direto, por laboratórios que atendam aos requisitos da norma CIP. Os transdutores de uso corrente devem ser calibrados por laboratórios que sejam capazes de realizar os métodos indiretos, com transdutor de referência. Desta forma, a calibração de transdutor de referência pode ser executada também por laboratórios de ensaio, desde que possuam capacidade para realizar a determinação da sensibilidade dos transdutores piezoelétricos de acordo com as normas da CIP (CIP, 2001).

A OTAN, por sua vez, não estabelece qualquer classificação para os transdutores, restringindo-se apenas à determinação dos níveis de pressão nos quais os transdutores piezoelétricos devem ser calibrados, empregando a calibração direta com peso morto ou indireta com bomba comparativa (NSO, 2020).

A SAAMI, no que lhe compete, define os instrumentos da cadeia de medição e os equipamentos a serem empregados na calibração de transdutores de uso corrente, sendo a bomba comparativa o método adotado pelas normas da organização (SAAMI, 2015). Tanto a SAAMI quanto a OTAN determinam que os transdutores de referência devem ser calibrados com padrões rastreáveis a institutos nacionais de metrologia.

Isso posto, salienta-se que os métodos de calibração são subdivididos em métodos direto e indireto, sendo aplicáveis aos transdutores piezoelétricos de acordo com a classificação destes, conforme resumido na Figura 28.



Figura 28 – Aplicação dos métodos de calibração aos diferentes tipos de transdutores piezoelétricos.

Sendo assim, de acordo com o que fora mencionado na subseção 2.3.2.5, a medição de carga elétrica dependerá diretamente das características do amplificador de carga, isto é, do ganho e, principalmente, da constante de tempo. Nos processos de calibração indireta, as bases normativas permitem que as medições de carga elétrica sejam realizadas de duas maneiras: dinâmica e quaseestática.

# 2.4.1.

#### Calibração dinâmica indireta

No processo de calibração dinâmica indireta (CDI), a medição de carga elétrica se dá a partir do instante em que se inicia o evento dinâmico inserido, ou seja, o degrau de pressão. Assim como no ensaio de pressão, a constante de tempo  $\tau$  deve estar de acordo com a duração esperada do degrau de pressão para

a correta medição. A Figura 29 ilustra os diferentes níveis de pressão desejáveis (a.1), (a.2) e (a.3), bem como as durações dos degraus negativos de pressão (b.1), (b.2) e (b.3).



Figura 29 - Representação gráfica característica da CDI.

No caso da calibração do transdutor HPI GP6, por exemplo, segundo Gautschi (2002), caso as medições sejam realizadas até o fundo de escala, ou seja 600 MPa, para um limite de erro de 12 MPa, sendo o limite para o tempo de duração das medições de carga definido no intervalo  $0 < t < 0,02\tau$ , é possível estimar as constantes de tempo necessárias para as respectivas durações do degrau de pressão, conforme Tabela 1:

> 5493,10 ms
> 2746,55 ms
> 1373,25 ms
> 732,40 ms
> 274,65 ms

Tabela 1 – Constantes de tempo no intervalo  $0 < t < 0,02\tau$ , para um limite de erro de 2 %. Duração do degrau de pressão (*t*) Constante de tempo ( $\tau$ )

# 2.4.2.

### Calibração quase-estática indireta

Assim como na CDI, a constante de tempo ( $\tau$ ) tem papel relevante na calibração quase-estática indireta (CQeI). Teoricamente, caso fosse necessária

uma medição estática de carga elétrica por meio de um amplificador de carga, bastaria que o resistor de realimentação  $R_f$  tivesse resistência infinita. Portanto, como não é possível realizar medições verdadeiramente estáticas, somente medições denominadas quase-estáticas podem ser efetuadas (Gautschi, 2002).

As medições quase-estáticas são viabilizadas com a utilização de resistores de realimentação com resistência superior a 100 T $\Omega$ , possibilitando medições com constante de tempo superior a 100 000 s (Gautschi, 2002).

Na CQel, as medições de carga elétrica são realizadas continuamente, isto é, à medida que o vaso é pressurizado, a carga elétrica é medida nos níveis de pressão pré-estabelecidos para a calibração. Na representação gráfica da Figura 30, conforme a pressão aumenta, sua medição é feita por meio do transdutor de referência, nos níveis (a.1), (a.2) e (a.3) e, simultaneamente, a carga elétrica originada nos níveis correspondentes (b.1), (b.2) e (b.3) é registrada. De posse dos dados, a curva de calibração do transdutor é ajustada, determinando assim a sensibilidade piezoelétrica.



Figura 30 - Representação gráfica característica da CQeI.

Por fim, cabe ressaltar que, nas medições quase-estáticas de carga elétrica, a presença do *drift* é um fator que deve ser levado em consideração. Além disso, observa-se que o *drift* não tem relação com o mensurando, apresentando comportamento considerado linear com relação ao tempo (Mack, 2001; Gautschi, 2002). Desta forma, alguns amplificadores de carga habilitados a realizar medições quase-estáticas possuem sistema de compensação de *drift*, como por exemplo Kistler 5018A, cujo *drift* máximo especificado é de 0,03 pC/s (Kistler

Group, 2021). Diante disso, verifica-se que a correta caracterização do *drift* é essencial para a garantia da confiabilidade metrológica, e portanto, deve ser considerado nos cálculos de incerteza de medição (Mack, 2001).

# Avaliação metrológica de certificados de calibração

A calibração dos transdutores piezoelétricos usados em ensaios balísticos consiste na determinação da sensibilidade piezoelétrica por meio de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, considerando o desvio padrão constante ao longo da faixa de medição. A característica da reta de ajuste a ser determinada pela calibração dependerá do transdutor piezoelétrico. No caso dos transdutores de medição direta, como o HPI GP6, por exemplo, a reta de ajuste possui intercepto nulo, diferentemente dos transdutores *conformal*, que necessariamente apresentarão intercepto diferente de zero.

# 3.1.

#### Mínimos quadrados com intercepto nulo

A CIP e a OTAN, por meio da AEP-97, determinam que os pontos de calibração relacionando pressão, na abscissa, e carga elétrica, na ordenada, sejam ajustados a uma reta com intercepto (coeficiente linear) nulo, ou seja, contendo a origem, conforme a expressão que se segue:

$$Q(P) = d \cdot P \tag{10}$$

Para o ajuste pelo método dos mínimos quadrados, é necessário o cálculo do resíduo, isto é, desvio vertical de um ponto obtido na calibração até a reta a ser ajustada, que será dado por:

$$resíduo = Q_i - d \cdot P_i \tag{11}$$

A soma dos quadrados dos resíduos será dada por:

$$f(d) = \sum_{i=1}^{n} (Q_i - d \cdot P_i)^2$$
(12)

Conforme o princípio dos mínimos quadrados (Devore, 2021), a estimativa de d é aquela que minimiza f(d). Portanto, basta que a derivada de f(d) em rela-

ção a *d* seja igual a zero, ou seja,  $\frac{\partial f}{\partial d} = 0$ . A partir daí, a estimativa de *d* pode ser determinada pela expressão que se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i^2}$$
(13)

3.2.

## Mínimos quadrados com intercepto não nulo

A SAAMI, no caso dos transdutores *conformal*, estabelece que a reta de ajuste seja composta por coeficientes angular e linear. A existência de coeficiente linear, neste caso, se deve à ausência de resposta do transdutor em baixas pressões, ocasionada pela lacuna invariavelmente existente entre o estojo e o diafragma do transdutor, independente da montagem deste último no provete ou adaptador destinado à calibração (PCB Piezotronics, 2015). Sendo assim, a expressão para o ajuste por mínimos quadrados é dada por:

$$Q(P) = d \cdot P + q_{Es} \tag{14}$$

Neste caso, o resíduo é dado por:

$$resíduo = Q_i - d \cdot P_i - q_{Es} \tag{15}$$

A soma dos quadrados dos resíduos é dada por:

$$f(d, q_{ES}) = \sum_{i=1}^{n} (Q_i - d \cdot P_i - q_{ES})^2$$
(16)

Segundo o princípio dos mínimos quadrados, determina-se a estimativa dos coeficientes angular (*d*) e linear ( $q_{ES}$ ) a partir de  $\frac{\partial f}{\partial d} = 0$  e  $\frac{\partial f}{\partial q_{ES}} = 0$ . Com isso, a partir da solução do sistema de equações, as expressões para os coeficientes angular e linear, respectivamente, são descritas como se segue:

$$d = \frac{n \cdot (\sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot P_i) - (\sum_{i=1}^{n} Q_i) \cdot (\sum_{i=1}^{n} P_i)}{n \cdot (\sum_{i=1}^{n} P_i^2) - (\sum_{i=1}^{n} P_i)^2}$$
(17)

$$q_{Es} = \frac{(\sum_{i=1}^{n} Q_i) \cdot (\sum_{i=1}^{n} P_i^2) - (\sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot P_i) \cdot (\sum_{i=1}^{n} P_i)}{n \cdot (\sum_{i=1}^{n} P_i^2) - (\sum_{i=1}^{n} P_i)^2}$$
(18)

#### 3.3.

#### Erro de linearidade

A partir da determinação da reta de ajuste por mínimos quadrados, o erro de linearidade é calculado, sendo definido como a medida percentual da máxima distância vertical entre os pontos de calibração e a reta ajustada ( $\Delta Q_{máx}$ ), ou seja, maior resíduo em módulo, com relação ao fundo de escala do transdutor piezoelétrico, ou seja, carga elétrica ( $Q_{fe}$ ) correspondente à pressão de fundo de escala do transdutor ( $P_{fe}$ ). Portanto, a expressão do erro de linearidade é apresentada como se segue:

$$L = \frac{\Delta Q_{m\acute{a}x}}{Q_{fe}} \cdot 100 \% = \frac{\Delta Q_{m\acute{a}x}}{d.P_{fe}} \cdot 100 \%$$
(19)

Para a CIP e a OTAN, o limite máximo do erro de linearidade para transdutores de uso corrente é de 1 %. Já para a SAAMI, o limite superior do erro de linearidade é de 1,5 %. Assim sendo, as normas definem a característica da curva para a regressão linear, bem com o método adotado para a classificação do transdutor quanto a sua vida útil, isto é, o erro de linearidade máximo.

#### 3.4.

#### Incerteza do ajuste

Segundo as três organizações normalizadoras de ensaios de munição, a partir da calibração, utilizam-se os valores determinados da sensibilidade (d) e, no caso do transdutor *conformal*, o coeficiente linear ( $q_{Es}$ ), sem qualquer exigência a respeito da incerteza de medição relacionada ao método de ajuste. Para a medição de pressão por meio dos transdutores piezoelétricos, com relação ao valor supostamente verdadeiro, é possível levar em consideração o desvio médio quadrático do ajuste para obter o valor da incerteza-padrão de uma correção.

Conforme descrito por Vuolo (1996) e pelo Guia para expressão da incerteza de medição – ISO GUM (ISO, 2008), as variâncias experimentais [s(d) e  $s(q_{Es})$ ] e o desvio médio quadrático do ajuste (s), medida da incerteza total do ajuste, são dados por:

a) Nos casos em que o intercepto é nulo, a incerteza do ajuste (*u<sub>fit</sub>*) é dada por

$$u_{fit} = \pm \sqrt{s^2} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_i - d \cdot P_i)^2}{n-1}}$$
(20)

A incerteza da sensibilidade é descrita por

$$u_d = \pm \sqrt{s^2(d)} = \pm \sqrt{\frac{s^2}{\sum_{i=1}^n P_i^2}}$$
(21)

b) Nos casos em que o intercepto é diferente de zero, a incerteza do ajuste  $(u_{fit})$  pode ser calculada conforme

$$u_{fit} = \pm \sqrt{s^2} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_i - d \cdot P_i - q_{ES})^2}{n-2}}$$
(22)

Neste caso, a incerteza da sensibilidade  $(u_d)$  é dada por

$$u_{d} = \pm \sqrt{s^{2}(d)} = \pm \sqrt{n \cdot \frac{s^{2}}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} P_{i}^{2}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} P_{i}\right)^{2}}$$
(23)

Além disso, a incerteza do intercepto  $(u_{q_{ES}})$  é descrita por

$$u_{q_{ES}} = \pm \sqrt{s^2(q_{ES})} = \pm \sqrt{\frac{s^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i\right)}{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n P_i\right)^2}}$$
(24)

Para o cálculo da incerteza de medição, é necessário levar em consideração a incerteza relacionada ao ajuste, conforme recomendação do ISO GUM (ISO, 2008). Embora não seja determinado nas normas das três organizações normalizadoras de ensaios de munição, a indicação da incerteza de medição nos certificados de calibração é exigência da norma ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017).

Apesar da falta de normalização relacionada ao cálculo de incerteza em calibração de transdutores piezoelétricos de medição de pressão transiente (Eichstädt, Esward e Schäfer, 2015; Theodoro *et al.*, 2016), alguns procedimentos de cálculo de incerteza podem ser encontrados na literatura, seja em calibração (Heine e Orlando, 2004) ou em ensaios de pressão de munições (Slanina e Wynands, 2021). Em ambos os casos, a incerteza de medição relacionada à calibração deve necessariamente ser calculada.

Conforme já mencionado, as normas voltadas para ensaios de munições estabelecem que o limite do erro de linearidade para a aceitação de um transdutor piezoelétrico é de 1 %, para a CIP e para a OTAN, e de 1,5 %, no caso da SAAMI. Como não há um método de cálculo de incerteza de medição estabelecido para a calibração de transdutores, o erro de linearidade tem papel fundamental na determinação sobre a prestabilidade de um transdutor piezoelétrico.

Desta forma, partindo do pressuposto de que o limite do erro de linearidade impõe uma determinada faixa de aceitação para a incerteza de medição relacionada ao ajuste pelo método dos mínimos quadrados, é interessante determinar qual o limite equivalente para os parâmetros de incerteza calculados.

Para o ajuste a uma reta com intercepto nulo, os parâmetros de incerteza calculados são a incerteza do ajuste  $(u_{fit})$  e a incerteza da sensibilidade  $(u_d)$ . Levando-se em consideração um transdutor HPI GP6, por exemplo, que tem a sensibilidade nominal, segundo o fabricante, de  $30 \ pC/MPa$ , e fundo de escala de  $600 \ MPa$ , é possível determinar o resíduo máximo admissível segundo a CIP e a OTAN, ou seja, equivalente a 1 % do fundo de escala. A carga correspondente ao fundo de escala  $(Q_{fe})$  será dada por:

$$Q_{fe} = d \cdot P_{fe} = 30 \cdot 600 = 18000 \ pC \tag{25}$$

Portanto, utilizando a expressão (20), o resíduo máximo será dado por:

$$L = \frac{\Delta Q_{max}}{Q_{fe}} \cdot 100 \%$$
 (26)

$$1\% = \frac{\Delta Q_{máx}}{18000 \ pC} \cdot 100 \ \% \tag{27}$$

$$\Delta Q_{max} = 180 \ pC \tag{28}$$

Admitindo que o resíduo siga uma distribuição normal e assumindo-se que o resíduo máximo corresponda ao nível de confiança de 95,45 % (k = 2), caracterizam-se os resíduos ( $\varepsilon$ ) com média ( $\mu$ ) nula e desvio padrão ( $\sigma$ ) igual a  $\Delta Q_{máx}/2$ , ou seja,

$$\varepsilon \sim N(\mu, \sigma^2)$$
 (29)

onde

$$\mu = 0 \ pC \ e \ \sigma = \frac{\Delta Q_{máx}}{2} = \frac{180}{2} = 90 \ pC \tag{30}$$

Neste caso, a partir da aproximação adotada, o limite do erro de linearidade máximo corresponderá à metade do resíduo máximo admissível.

Para estimar o valor equivalente do parâmetro de incerteza para o limite de 1 % do erro de linearidade, utiliza-se uma simulação com o auxílio do software Matlab (versão 9.13.0.2105380). Por meio da função "randn(n)", que gera números aleatórios entre -1 e 1, é possível obter dados para uma simulação cujos parâmetros de entrada são os resíduos com distribuição normal.

Para determinar qual o parâmetro a ser utilizado na equivalência com o erro de linearidade máximo, considera-se um conjunto de calibrações com sete níveis de pressão (*P*), conforme a Tabela 2, assumindo-se que estas são as pressões de referência utilizadas na calibração simulada:

Tabela 2 - Níveis d	de pressão	de referênci	a para um	ciclo de cal	bração par	a o transdu	tor HPI GP6.
Níveis	1	2	3	4	5	6	7
Pressão (MPa	) 50	100	200	300	400	500	600

A partir da definição dos níveis de pressão (P), são gerados números aleatórios, correspondentes a n ciclos de calibração empregando os 7 níveis de pressão. Para a adequação dos números gerados ao resíduo, utiliza-se a expressão que se segue:

$$\varepsilon = randn(n) \cdot \sigma + \mu \tag{31}$$

Adotando as características do transdutor piezoelétrico HPI GP6, calculase a carga correspondente à sensibilidade nominal ( $d_0$ ), adicionando-se o resíduo gerado pelo Matlab, conforme a expressão:

$$\hat{Q} = d_0 \cdot P + \varepsilon \tag{32}$$

onde *P* corresponde aos níveis de pressão de referência. A Figura 31 ilustra os dados obtidos para 50 ciclos, ou seja, 350 pontos.



Figura 31 - Resultado da simulação gerado pelo Matlab: dados correspondentes à simulação de calibração com 50 ciclos e 7 níveis de pressão.

Com os dados de carga elétrica gerados pela simulação e as pressões de referência conforme a Tabela 2, é possível realizar o ajuste pelo método dos mínimos quadrados a uma reta com intercepto nulo, determinando a sensibilidade piezoelétrica, a incerteza do ajuste e a incerteza da sensibilidade, calculados por meio das expressões (13), (20) e (21), respectivamente.

Para analisar o comportamento das incertezas do ajuste e da sensibilidade, foram realizadas 50 simulações e os respectivos ajustes por mínimos quadrados, considerando calibrações entre 1 e 50 ciclos. A partir daí, foi possível verificar, conforme a Figura 32, o resultado dos cálculos de incerteza.



Figura 32 – Resultado das simulações de calibração compostas de 1 a 50 ciclo: (a) incerteza da sensibilidade; (b) incerteza do ajuste.

Como é possível observar na Figura 32, conforme eleva-se a quantidade de ciclos de calibração, a tendência é que o valor da incerteza da sensibilidade seja cada vez menor. Com isso, quanto mais ciclos de calibração forem realizados com o transdutor, menor será a magnitude da incerteza da sensibilidade.

Em contrapartida, percebe-se a distribuição da incerteza do ajuste em torno da média calculada para todas as simulações. Portanto, a incerteza do ajuste poderá ser utilizada para estimar o valor equivalente ao limite do erro de linearidade. Uma vez que o nível de confiança adotado foi de 95,45 % (k = 2), espera-se que a incerteza do ajuste assuma o valor do desvio padrão adotado, ou seja:

$$u_{fit} = \sigma = \pm \frac{\Delta Q_{máx}}{2} \tag{33}$$

Para validar os cálculos, foi realizada a simulação semelhante à descrita anteriormente, entretanto, utilizou-se um número superior de pontos, visando garantir que os resíduos apresentem as características da distribuição de probabilidade estabelecida. Com o Matlab, foram gerados 10<sup>6</sup> números aleatórios, originando resíduos conforme a Figura 33. A partir do histograma, é possível observar que os dados gerados para a simulação se aproximam de uma

Gaussiana, correspondente à distribuição de probabilidade normal considerada para os resíduos.



Figura 33 – Histograma dos resíduos gerados na simulação para a determinação de incerteza do ajuste equivalente ao limite do erro de linearidade de 1 %, no caso do transdutor HPI GP6.

A partir dos dados, realizaram-se 10 simulações, sendo possível obter os seguintes valores para a incerteza do ajuste, conforme a Tabela 3:

Simulações	HPI GP6			
$u_{fit_1}$ (pC)	± 89,9930			
$u_{fit_2}$ (pC)	± 90,0191			
<i>u<sub>fit<sub>3</sub></sub></i> (pC)	± 89,9767			
$u_{fit_4}$ (pC)	± 90,0307			
u <sub>fit5</sub> (pC)	± 89,9362			
u <sub>fit6</sub> (pC)	± 90,0057			
u <sub>fit7</sub> (pC)	± 90,0977			
u <sub>fit8</sub> (pC)	± 89,8960			
u <sub>fit</sub> , (pC)	± 90,0108			
<i>u<sub>fit10</sub></i> (pC)	± 89,9233			
Média (pC)	± 89,9889			

	ua siniulação.
Simulações	HPI GP6

Sendo assim, os resultados confirmam que, a partir da aproximação dos resíduos para a distribuição normal de probabilidade, a incerteza do ajuste será equivalente ao desvio padrão dos resíduos, correspondendo a 0,5 % do fundo de escala, com nível de significância de 95,45 %.

# 3.5.

### Significância do intercepto

Os transdutores piezoelétricos são instrumentos ativos, produzindo carga elétrica à medida que os cristais são comprimidos. Desta forma, não é esperado que carga elétrica seja produzida sem a aplicação de qualquer esforço. Entretanto, a presença significativa de *drift* deve ser levada em consideração quanto à geração de carga elétrica sem a pressurização do sistema destinado à calibração. A presença de um *drift* relevante na cadeia de medição pode ser ocasionada por mau funcionamento do amplificador de carga ou devido à configuração inadequada da instrumentação, como por exemplo a ausência de controle de *drift* automatizado no amplificador ou procedimento que vise minimizá-lo (Gautschi, 2002).

A presença de *drift* na cadeia de medição, uma vez que ele consiste em uma carga elétrica indesejada e sem relação com o mensurando, a depender de sua magnitude, poderá contribuir com uma parcela significativa de erro sistemático. Portanto, o ajuste para a reta com intercepto nulo poderá eventualmente omitir informações relevantes quanto à presença de *drift* na medição de carga elétrica. Em contrapartida, o ajuste com intercepto não nulo pode viabilizar a possível identificação do *drift*, permitindo a sua correção ou compensação, ou até mesmo a identificação da provável falha na cadeia de medição.

Isto posto, com o objetivo de estudar o erro sistemático gerado na calibração, é possível indicar a avaliação da significância do intercepto nos casos das calibrações segundo a CIP e a OTAN. Uma forma de avaliar tal aspecto é utilizar o Teste *t*, considerando o intercepto nulo como a hipótese nula (Mulholland e Hibbert, 1997; Ellison, Farrant e Barwick, 2009), isto é:

$$H_0: q_{Es} = 0$$
$$H_1: q_{Es} \neq 0$$

Para a determinação da significância do intercepto, compara-se o valor de t com o valor crítico para o nível de confiança ( $\alpha$ ) de 95 %, onde:

$$t = \frac{q_{ES}}{s(q_{ES})} \tag{34}$$

Para a rejeição da hipótese nula  $H_0$ , basta que  $t \leq -t\alpha_{/_2,n-2}$  ou  $t \geq t\alpha_{/_2,n-2}$ , para n-2 graus de liberdade, ou ainda que o valor p seja menor que 0,05. Neste caso, não se deve considerar o intercepto nulo (Figura 34).



Figura 34 - Diagrama representando regiões de aceitação e rejeição para o Teste t.

Outra forma de avaliar a significância do intercepto é compará-lo com seu erro padrão ( $s(q_{Es})$ ). Se o intercepto for menor que  $s(q_{Es})$ , considera-se que a constante não tenha significância estatística (Dolan, 2009).

## 3.6.

# Aplicação da avaliação do resultado do ajuste

Este capítulo dedicou-se a detalhar as características do ajuste realizado na calibração de transdutores piezoelétricos. A partir de agora, os métodos descritos anteriormente serão aplicados a certificados de calibração de transdutores piezoelétricos, cujo resultado dos cálculos dos parâmetros está apresentado no Apêndice A.

Para os transdutores HPI, foram calculados os parâmetros para os casos com intercepto nulo e com intercepto não nulo. Comparando os resultados do cálculo da incerteza do ajuste com o erro de linearidade, ilustrados na Figura 35, em onze casos, quando o transdutor foi reprovado ou aprovado pelo limite do erro de linearidade, o resultado foi o mesmo para o limite da incerteza do ajuste. Em um único caso, de índice 12, houve a aprovação segundo o limite do erro de linearidade e a reprovação segundo a incerteza do ajuste. Tal fato pode indicar


que a escolha do limite de 0,5 % para a incerteza do ajuste tenha sido conservadora com relação ao limite original de 1 % para o erro de linearidade.

Figura 35 – Comparativo entre os resultados para o erro de linearidade e a incerteza do ajuste.

Além disso, conforme a Tabela 22 apresentada no Apêndice A, em todos os casos houve a rejeição da hipótese nula no Teste *t* de significância do intercepto, indicando que tal parcela, correspondente ao erro sistemático, não deve ser rejeitada. Isso é percebido também na comparação entre os valores calculados para os interceptos e as respectivas incertezas. Em todos os certificados, o valor do intercepto foi maior que a incerteza calculada para o parâmetro de ajuste.

# Modelagem e simulação da cadeia de medição de pressão transiente

A medição de pressão transiente por meio de transdutores piezoelétricos, por envolver necessariamente a cadeia de medição apresentada na Figura 4, necessita de cuidados com relação à seleção e configuração da instrumentação envolvida no processo, sobretudo com relação ao amplificador de carga, conforme já mencionado anteriormente. A impossibilidade de medir diretamente o fenômeno dinâmico sem a utilização de transdutor ou amplificador amplia a complexidade da medição, à medida que cada componente da cadeia influenciará individualmente nas características do sinal de entrada, refletindo em uma resposta invariavelmente distinta do mensurando, ou seja, da pressão transiente a ser medida.

A modelagem da cadeia de medição tem por objetivo prover um melhor entendimento das características elétricas de seus componentes, neste caso o transdutor piezoelétrico e o amplificador de carga, sendo ferramentas essenciais para o projeto de sistemas de medição baseados em transdutores piezoelétricos (Guan e Liao, 2004).

Neste trabalho, a modelagem da cadeia de medição visa auxiliar na avaliação da influência da instrumentação, isto é, do amplificador de carga, utilizado na calibração de transdutores piezoelétricos, além da influência da duração dos fenômenos dinâmicos nos processos de calibração.

Para isso, inicialmente foram realizadas as caracterizações dos dois principais componentes da cadeia de medição, um transdutor piezoelétrico, o HPI GP6, e um amplificador de carga, o HPI B217. Em seguida, a partir do modelo Butterworth-Van Dyke, ilustrado na Figura 23, e do modelo elétrico de amplificador de carga mostrado na Figura 24, os valores iniciais para os elementos dos respectivos circuitos elétricos foram determinados de forma independente. Finalizando a modelagem, os parâmetros do circuito foram refinados, desta vez empregando o modelo de circuito elétrico da cadeia de medição completa, ilustrado na Figura 36, por meio da curva de pressão transiente obtida experimen-

talmente.



Figura 36 – Modelo elétrico adotado para a cadeia de medição de pressão transiente.

A partir da modelagem implementada, foram realizadas simulações de medições de pressão em procedimentos de calibração dinâmica e quase-estática, visando, no primeiro caso, à avaliação da influência da duração do fenômeno dinâmico e, por fim, à avaliação da influência de diferentes configurações do amplificador de carga.

## 4.1.

## Caracterização e modelagem da cadeia de medição

Para a caracterização dos componentes da cadeia de medição foram adotadas as técnicas da análise de impedância, no caso do transdutor piezoelétrico, e da observação das respostas mediante entradas conhecidas, para o amplificador de carga.

## 4.1.1.

## Caracterização e modelagem do transdutor piezoelétrico

A modelagem do transdutor piezoelétrico por meio da análise de impedância inicia-se a partir da definição do modelo elétrico a ser utilizado, o Butterworth-Van Dyke, indicado na Figura 23 e na Figura 36. Para o modelo de transdutor piezoelétrico, como a sua aplicação é a medição de pressão transiente, a pressão deve ser o dado de entrada do circuito, podendo ser inserida no modelo BVD por meio da fonte de corrente (*I*), que é determinada pela derivada da carga com relação ao tempo (dQ/dt), ou pela derivada da pressão no tempo (dP/dt), multiplicada pela sensibilidade piezelétrica (*d*):

$$I = \frac{dQ}{dt} = d \cdot \frac{dP}{dt}$$
(35)

Para o modelo BVD, sua impedância ( $Z_{BVD}$ ) pode ser definida conforme a expressão a seguir:

$$Z_{BVD} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_0}\right) \cdot \left(j\omega L_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)}{\frac{1}{j\omega C_0} + j\omega L_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}}$$
(36)

A partir da equação da impedância do modelo BVD (36), seus elementos podem ser determinados por meio do ajuste pelo método dos mínimos quadrados à impedância obtida experimentalmente (Casteleiro-Roca *et al.*, 2014; Stutzer *et al.*, 2023). Para tal, foi utilizado o analisador de impedância Keysight E4900A, que, basicamente, excita o transdutor por intermédio de uma tensão de 100 mV com frequência variável e mede sua resposta, fornecendo a reatância e a resistência para uma faixa de frequências de 1 kHz até 100 kHz. Calculada pela Transformada Rápida de Fourrier (*Fast Fourrier Transform* – FFT), a transformação no domínio da frequência do sinal pressão-tempo mostrado na Figura 37, filtrado por um filtro passa-baixa Butterworth de 2ª ordem de 10 kHz, mostra que o sinal útil é inferior a 20 kHz. Sendo assim, considera-se aceitável utilizar a faixa de frequência (1 – 100 kHz) para ajuste de impedância.



Figura 37 – FFT de uma curva de pressão no tempo característica de uma medição de pressão de munição.

Para a medição de impedância junto ao analisador de impedância, é possível utilizar diversos circuitos de conexão a depender de uma série de fatores, como por exemplo, a faixa de frequência a ser examinada. Neste caso, empregouse o circuito detalhado na Figura 38, denominado *Auto-Balancing Bridge Method*.



Figura 38 – Circuito Auto-Balancing Bridge Method empregado na análise de impedância do transdutor piezoelétrico HPI GP6 (adaptado de Keysight Technologies (2016)).

No circuito de medição, a corrente  $I_x$  passa através do transdutor piezoelétrico. Por sua vez, a corrente  $I_r$ , que passa pelo resistor  $R_r$ , é convertida em tensão  $V_r$ , medida pelo terminal 4.

$$\frac{V_x}{Z_x} = I_x = I_r = \frac{V_r}{R_r}$$
(37)

Como a corrente  $I_r$  é igual a  $I_x$ , a impedância  $Z_x$  é determinada por meio das tensões  $V_x$  e  $V_r$ , medidas pelos terminais 2 e 4, respectivamente (Keysight Technologies, 2016), isto é,

$$Z_x = R_r \cdot \frac{V_x}{V_r}.$$
(38)

A Figura 39 mostra a conexão do transdutor piezoelétrico junto ao analisador de impedância.



Figura 39 – Análise de impedância do transdutor HPI GP6 empregando: (a) o analisador de impedância Keysight E4900A; (b) o circuito de conexão *Auto-Balancing Bridge Method*; (c) conectado ao transdutor piezoelétrico.

A partir do resultado da análise de impedância, para a determinação dos parâmetros do modelo BVD do transdutor piezoelétrico HPI GP6 foi utilizada a função *lsqcurvefit*, disponível no MATLAB (versão 9.13.0.2105380). A função recebe como parâmetros de entrada uma função não-linear, bem como os dados aos quais ela deve ser ajustada, além dos valores iniciais e os limites superior e inferior para as variáveis a serem estimadas. A função referida pode ser representada por:

$$x = lsqcurvefit(fun, x0, xdata, ydata, lb, ub),$$
(39)

onde os parâmetros contidos no vetor x, variáveis da função fun não-linear definida pelo usuário, serão determinados por intermédio do ajuste por mínimos quadrados aos dados  $x_{data}$  e  $y_{data}$ , dada a estimativa inicial  $x_0$  para os parâmetros de saída, respeitando os limites superior e inferior pré-definidos, isto é lb < x < ub.

Após a medição da impedância do transdutor piezoelétrico HPI GP6 por meio do analisador de impedância, de posse dos dados obtidos e a partir da

impedância determinada pelo modelo BVD, o ajuste no MATLAB com o emprego da função *lsqcurvefit* pôde ser obtido como mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Resultado do ajuste dos dados para o modelo BVD: (a) resistência e; b) reatância.

A função *lsqcurvefit* permitiu a primeira estimativa para os parâmetros do modelo BVD correspondente ao transdutor HPI GP6, apresentados na Tabela 4.

Parâmetro	Valor
C <sub>0</sub>	0,20704 <i>n</i> F
$R_m$	82,39631 ΜΩ
$L_m$	0,12766 μH
$C_m$	0,56565 pF

Tabela 4 – Parâmetros do transdutor piezoelétrico HPI GP6 determinados com a modelagem.

## 4.1.2.

#### Caracterização e modelagem do amplificador de carga

A próxima etapa da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente é a caracterização e modelagem do amplificador de carga. Conforme já apresentada na Figura 24 e na Figura 36, a topologia adotada é composta pelas impedâncias de entrada ( $Z_1$ ) e de realimentação ( $Z_2$ ), indicadas na Figura 41.



Figura 41 – Topologia do amplificador de carga: composição das impedâncias de entrada ( $Z_1$ ) e de realimentação ( $Z_2$ ).

Neste modelo de circuito, para determinar a função de transferência definem-se as impedâncias de entrada ( $Z_1$ ) e de realimentação ( $Z_2$ ), dadas por:

$$Z_1 = R_{in}$$
,  $Z_2 = \frac{1/C_f}{s + 1/R_f C_f}$  (40)

Pela lei de Kirchoff das correntes, tem-se:

$$\frac{E_i(s) - E'(s)}{Z_1} = \frac{E'(s) - E_0(s)}{Z_2}$$
(41)

Na entrada do amplificador, há um curto virtual, portanto,  $E'(s) \cong 0$ . Desta forma, a função de transferência fica determinada da seguinte forma:

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = -\frac{1/R_{in}C_f}{s+1/C_f R_f}$$
(42)

Aplicando a transformada de Laplace inversa na resposta ao degrau unitário, a tensão de saída obtida será:

$$e_o(t) = \frac{R_f}{R_{in}} \cdot \left( e^{-\frac{t}{R_f C_f}} - 1 \right)$$
(43)

Mediante a entrada de um sinal em degrau unitário, a tensão de saída inicial será nula, atingindo  $-R_f/R_{in}$  de acordo com a função exponencial com a constante de tempo  $\tau = C_f R_f$ .

Para caracterizar o amplificador de carga HPI B217, permitindo inclusive a determinação da constante de tempo, foi adotado o seguinte procedimento: a partir de uma entrada em tensão previamente definida, foi observada a resposta

do amplificador utilizando-se o osciloscópio digital Tektronix modelo TBS 1102B. A entrada foi estabelecida empregando-se o gerador de função HPI B202, conforme a Figura 42. O instrumento gerou uma curva retangular negativa  $e_i(t)$ com valor mínimo de -2,7 V, aproximadamente.



Figura 42 – Entrada em tensão gerada pelo HPI B202 para a caracterização do amplificador de carga HPI B217.

Acoplado à saída do gerador de função, foi inserido um capacitor de referência com capacitância ( $C_{ref}$ ), permitindo que a tensão  $e_i(t)$  fosse convertida em carga elétrica (Q(t)), conforme a expressão a seguir:

$$Q(t) = C_{ref} \cdot e_i(t) \tag{44}$$

A carga elétrica (Q(t)), por sua vez, será a entrada do amplificador de carga a ser modelado, conectado em série ao gerador de função e ao capacitor de referência. A Figura 43 ilustra o circuito empregado na modelagem do amplificador de carga.



Figura 43 – Circuito empregado na caracterização do amplificador de carga.

A resposta  $e_0(t)$  do circuito apresentado na Figura 43 foi observada com o auxílio do mesmo osciloscópio mencionado anteriormente. Para a caracterização foram utilizados quatro capacitores de referência distintos, com as respectivas capacitâncias descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Capacitâncias dos quatro capacitores de referência usados na caracterização do amplificador de carga.

C <sub>ref1</sub>	C <sub>ref2</sub>	C <sub>ref3</sub>	C <sub>ref4</sub>
2218,8 pF	2199,2 pF	1509,7 pF	1000,1 pF

A Figura 44 mostra a conexão dos instrumentos em série para a caracterização do amplificador de carga HPI B217.



Figura 44 – Instrumentos usados na caracterização conectados em série: (a) gerador de função HPI B202; (b) capacitor de referência; (c) amplificador de carga HPI B217 e; (d) osciloscópio.

A partir das diferentes respostas obtidas na caracterização, de forma semelhante à modelagem do transdutor piezoelétrico, foi utilizada uma ferramenta de ajuste de curvas do MATLAB. Desta vez, a função empregada foi a *lsqnonlin*, que retorna o vetor x das variáveis a serem determinadas na função *fun*, mediante a definição dos limites inferior *lb* e superior *ub* e um valor inicial fornecido  $x_0$  para os parâmetros.

$$x = lsqnonlin(fun, x0, lb, ub)$$
(45)

A função *fun* retorna a diferença entre os dados de entrada, obtidos no caso com o osciloscópio, e o resultado do ajuste em função dos parâmetros correspondentes à iteração. Para este caso específico, uma rotina foi desenvolvida para utilizar, em cada iteração, o resultado de uma simulação

executada em LTspice (versão 17.0.36.0), ou seja, os parâmetros correspondentes foram inseridos no software de simulação e o resultado foi subtraído dos dados de entrada obtidos com o osciloscópio, determinando assim o erro, saída da função *fun*. A Figura 45 ilustra a rotina desenvolvida para a caracterização do amplificador de carga.



Figura 45 – Esquemático do método de ajuste utilizado para a modelagem do amplificador de carga.

Aplicando o processo de modelagem descrito, os resultados são apresentados na Figura 46, tanto da caracterização quando do ajuste executado no MATLAB em conjunto com o LTspice, indicando as curvas correspondentes a cada  $C_{ref}$ .



Figura 46 – Resultados do ajuste, apresentados para cada capacitor de referência.

Com isso, os parâmetros do modelo do amplificador de carga puderam ser estimados, conforme a Tabela 6. O coeficiente de determinação do ajuste foi de 0,9984 e a constante de tempo do amplificador foi calculada para  $\tau = 0,6273$  s. O fator de amplificação do amplificador de carga HPI B217 é 1,667 mV/pC, determinado pela relação entre a tensão máxima de resposta e a carga de entrada determinada pela equação (44).

Parâmetro	Valor
$R_f$	1,07132 <i>G</i> Ω
$C_{f}$	0,585553 nF
$R_{in}$	1,00236 $k\Omega$

Tabela 6 – Parâmetros do amplificador de carga HPI B217 determinados com a modelagem.

## 4.1.3.

## Modelagem da cadeia de medição

A partir da primeira estimativa para os parâmetros dos modelos elétricos do transdutor piezoelétrico e do amplificador de carga, determinados para cada componente da cadeia de medição isoladamente, conclui-se a modelagem com o refinamento dos parâmetros levando-se em consideração os dois componentes em conjunto, conforme a Figura 47.



Figura 47 – Circuito da cadeia de medição de pressão transiente composta por transdutor piezoelétrico e amplificador de carga.

Para a etapa final, é necessário definir a entrada e a resposta esperada para o circuito, para então proceder o refinamento dos parâmetros, de forma semelhante à modelagem do amplificador de carga.

Considerando a curva de pressão obtida experimentalmente para a munição 7,62 mm x 51 mm NATO, ilustrada na Figura 15, admitindo que ela corresponda à entrada do transdutor piezoelétrico, é desejável que a resposta da cadeia de medição seja idêntica a este sinal de pressão transiente. Sendo assim, para o refinamento procedeu-se um ajuste por mínimos quadrados da resposta da cadeia de medição mediante a entrada conforme a Figura 15.

Para isso, empregando-se a função *lsqnonlin* do MATLAB, os parâmetros da cadeia de medição foram ajustados aos dados simulados pelo modelo elétrico implementado no LTspice, ou seja, os parâmetros do modelo completo da cadeia de medição foram inseridos no LTspice, e os resultados da simulação foram comparados com os dados experimentais, idênticos aos dados de entrada do modelo, determinando assim o erro. Neste caso, os valores iniciais dos sete parâmetros foram os obtidos nas duas primeiras etapas da modelagem, ou seja, nas modelagens do transdutor piezelétrico e do amplificador de carga. A Figura 48 ilustra a rotina de refinamento dos parâmetros determinados nas modelagens.



Figura 48 – Esquemático do método de ajuste utilizado para o refinamento dos parâmetros da cadeia de medição de pressão dinâmica.

As três etapas da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente são apresentadas esquematicamente na Figura 67, no Apêndice B.

Executando o procedimento descrito para o refinamento dos parâmetros, o ajuste foi obtido conforme a Figura 49, com coeficiente de determinação de 0,9999.



Figura 49 – Resultado do ajuste realizado, por meio dos dados experimentais, para o refinamento dos parâmetros, e o erro calculado.

O erro calculado pode ser melhor observado na Figura 50, cujo erro correspondente ao ponto de carga elétrica máxima foi de 6,8951 pC (0,0575 %) e o valor máximo absoluto do erro foi de 107,0289 pC (0,8925 %).



Figura 50 – Erro obtido com a etapa final da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente.

Concluída a modelagem da cadeia de medição de pressão transiente<sup>1</sup>, os parâmetros ficam determinados, conforme indicado na Tabela 7.

Parâmetro	Valor
Co	0,20704 nF
$R_m$	80,78297 ΜΩ
$L_m$	0,13356 μH
$C_m$	0,55958 pF
$R_f$	1,06508 GΩ
$C_{f}$	0,59947 nF
R <sub>in</sub>	0,72604 kΩ

Tabela 7 – Parâmetros do modelo elétrico da cadeia de medição de pressão transiente.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Foi produzido artigo abordando a modelagem apresentada na seção 4.1. O artigo intitulado: "Modeling of Ammunition Dynamic Pressure Measurement Chain in Ballistic Tests" foi publicado na revista *Sensors* em 26 de setembro de 2023 e encontra-se localizado no **Anexo A**.

## 4.2.

# Avaliação de métodos de calibração de transdutores piezoelétricos baseada em simulação

A modelagem da cadeia de medição de pressão transiente viabiliza a simulação de calibrações e ensaios balísticos. Por meio da simulação de calibração, é possível observar não somente o comportamento da resposta da cadeia de medição mediante a variação da entrada de pressão transiente, mas também o comportamento da saída diante da mudança da constante de tempo do amplificador de carga.

Como já abordado, as principais variações no processo de calibração de transdutores piezoelétricos são as denominadas calibração dinâmica e a calibração quase-estática. A primeira envolve a medição da pressão transiente mediante a súbita variação de pressão. Já na segunda, por meio da mudança na constante de tempo ( $\tau$ ), é possível medir a pressão transiente com variações mais lentas.

#### 4.2.1.

#### Calibração dinâmica

Na calibração dinâmica, tanto no método direto, utilizando-se o peso morto, quanto no método indireto, por meio de transdutores de referência com a bomba comparativa, um dos principais aspectos a serem considerados é a duração do evento dinâmico, ou seja, a duração da variação de pressão inserida no processo de calibração. As simulações realizadas nesta seção visam demonstrar a influência da duração do evento dinâmico inserido no processo de calibração.

Levando-se em consideração a cadeia de medição modelada, a constante de tempo ( $\tau$ ) correspondente ao amplificador de carga HPI B217 é de 638,5 ms, determinada pela multiplicação dos componentes  $R_f$  e  $C_f$ . Como este instrumento destina-se a medições em ensaios balísticos, onde a variação entre a pressão atmosférica e a pressão máxima ocorre em aproximadamente 0,3 ms, conforme o exemplo da Figura 15, esta constante de tempo é adequada, mas espera-se que variações de pressão muito lentas ocasionem a atenuação no sinal de resposta da cadeia de medição.

Para as simulações, as variações de pressão foram caracterizadas como degraus negativos de pressão, modelados conforme a expressão a seguir:

$$Q(t) = d \cdot P_{max} \left( 1 - \frac{1}{(1 + e^{-2kt})} \right)$$
(46)

onde *d* representa a sensibilidade piezoelétrica,  $P_{max}$  a pressão máxima inicial da calibração e *k* o coeficiente que determinará a duração do degrau de pressão.

Desta forma, foram simulados cinco degraus negativos de pressão, desde o mais lento, com variação de 109,862 ms, até o mais rápido com duração de 5,493 ms, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Duração dos degraus negativos de pressão simulados com o modelo elétrico da cadeia de medição, e os correspondentes valores para a constante k.

k = 20	k = 40	k = 80	k = 150	k = 400
109,862 ms	54,931 ms	27,465 ms	14,648 ms	5,493 ms

Na simulação, considerou-se a variação de pressão entre 400 MPa e a pressão atmosférica, utilizando-se a sensibilidade piezoelétrica de 33 pC/MPa, correspondendo à carga elétrica máxima de 13 200 pC. A corrente (*I*), entrada do modelo elétrico, foi calculada por meio da derivação discreta da pressão (*P*) com relação ao tempo, conforme a expressão (35). Os cinco degraus de pressão são mostrados na Figura 51.



Figura 51 – Sinais de entrada para a simulação de calibração dinâmica.

Mediante as entradas em degrau apresentadas, o modelo da cadeia de medição de pressão transiente resultou nas respostas conforme a Figura 52.



Figura 52 – Respostas do modelo da cadeia de medição de pressão transiente mediante a entrada de degraus de pressão.

Analisando as respostas, percebe-se que, conforme esperado, quanto mais lento o evento dinâmico, ou seja, a abertura do sistema de válvulas representado pelo degrau negativo inserido no modelo, maior a atenuação do sinal de entrada pela cadeia de medição. Em todos os casos, após atingir os respectivos valores mínimos, as curvas de carga elétrica seguem a curva de descarga característica do amplificador de carga modelado. A Tabela 9 detalha, para cada curva de carga elétrica originada com a simulação, a diferença entre a carga desejada, ou seja, -13 200 pC, e a carga mínima obtida, além da pressão equivalente, considerando a sensibilidade piezelétrica de 33 pC/MPa.

Duração do degrau	Carga mínima	Erro (%)
109,862 ms	-11 150 pC	2050 pC (15,53 %)
54,931 ms	−11 982 pC	1218 pC (9,23 %)
27,465 ms	−12 499 pC	701 pC (5,31 %)
14,648 ms	−12 786 pC	414 pC (3,14 %)
5,493 ms	−13 025 pC	175 pC (1,32 %)

Tabela 9 – Resultado das simulações de calibração dinâmica para o modelo de transdutor piezoelétrico HPI GP6 e amplificador de carga HPI B217.

Segundo os resultados apresentados, o erro mínimo obtido foi de 1,32 % para o degrau de pressão negativo com duração de 5,493 ms. De acordo com Gautschi (2002), para que esta curva de pressão seja medida conforme o limite de erro de 2 %, a constante de tempo ( $\tau$ ) necessária seria de 274,655 ms. Com o

objetivo de verificar se o limite da duração do evento dinâmico de  $0,02\tau$  corresponde ao limite do erro mencionado, a constante de tempo do amplificador de carga foi modificada mediante a alteração do valor do resistor de realimentação  $(R_f)$ , conforme a expressão:

$$R_f = \frac{C_f}{\tau} = \frac{0,59947 \cdot 10^{-9}}{274,655 \cdot 10^{-3}} = 0,45816 \text{ G}\Omega$$
(47)

Portanto, realizou-se uma nova simulação com o novo valor para o resistor de realimentação ( $R_f$ ), empregando o degrau negativo de pressão com duração de 5,493 ms, que pode ser observado na Figura 51, gerando o resultado conforme a Figura 53.



Figura 53 – Resposta da simulação do degrau negativo de pressão com duração de 5,493 ms, com a constante de tempo ( $\tau$ ) do amplificador de carga de 274,655 ms.

Diante da resposta obtida, verificou-se que a carga mínima medida pelo amplificador de carga foi de -12 832 pC, equivalente a um erro de 2,79 %. Conforme esperado, para um determinado evento dinâmico, quanto menor a constante de tempo, neste caso reduzida de 638,5 ms para 274,655 ms, maior será o erro na medição de carga elétrica. O erro obtido nesta simulação foi superior ao limite de erro mencionado por Gautschi (2002) de 2 %, entretanto, uma vez que o erro máximo absoluto encontrado na modelagem da cadeia de medição foi de 0,8925 %, considera-se o resultado satisfatório.

## 4.2.2.

#### Calibração quase-estática

Para a calibração quase-estática, em que são empregadas elevadas constantes de tempo, chegando a valores superiores a 100 000 s, a variação de pressão é gradativa, sem a necessidade da inserção de mudanças abruptas de níveis de pressão no processo de calibração. A principal desvantagem das medições quase-estáticas de carga elétrica é a incidência de elevados níveis de *drift*, produzidos em amplificadores de carga reais. O modelo elétrico desenvolvido neste trabalho não apresentará tal fenômeno, porém, ele sempre deve ser levado em consideração nos projetos de cadeia de medição de pressão transiente.

Quanto à definição das constantes de tempo a serem usadas na simulação de medições quase-estáticas, buscou-se no mercado informação a respeito dos amplificadores de carga comerciais que atendem ao tipo de calibração descrito. Destacam-se três modelos, listados abaixo:

- Modelo A Kystler 5018A;
- Modelo B PCB 443B102; e,
- Modelo C Fylde FE128CAH.

Os modelos A e B apresentam a possibilidade de medições com constante de tempo equivalentes à 100 000 s, enquanto para o modelo C, o maior valor possível para a constante de tempo é de 10 000 s. Os três modelos abordam a ocorrência de *drift* nas medições com a constante de tempo mais longa, sendo que os modelos A e B são dotados de sistema de compensação, visando à redução de sua influência nas medições de carga elétrica. A Tabela 10 lista as principais características dos modelos mencionados.

de carga cicínica.		• · · · •		
Modelo	Fundo de escala	Constante de tempo máxima	Drift	
A	2 200 000 pC	100 000 s	< 0,03 pC/s	
В	100 000 pC	100 000 s	< 0,03 pC/s	
С	50 000 pC	10 000 s	1 pC/s	

Tabela 10 – Características dos amplificadores de carga habilitados às medições quase-estáticas de carga elétrica.

Com foco nos amplificadores encontrados no mercado, foram realizadas seis simulações com configurações de constante de tempo distintas, cada uma

determinada pela modificação do resistor de realimentação ( $R_f$ ), de forma semelhante ao realizado com a expressão (47). As configurações estão detalhadas na Tabela 11.

Constante de tempo (τ)	Resistor de realimentação ( $R_f$ )
0,6385 <i>s</i>	1,06 GΩ
10 <i>s</i>	16,68 GΩ
100 <i>s</i>	166,81 GΩ
1000 <i>s</i>	1,67 ΤΩ
10 000 s	16,68 ΤΩ
100 000 <i>s</i>	166,81 ΤΩ

Tabela 11 - Parâmetros do amplificador de carga variados na simulação de calibração quaseestática.

Para a definição da curva de pressão de entrada característica da calibração quase-estática, buscou-se novamente a referência no mercado, desta vez com o equipamento de calibração HPI B630. Ele se destina à calibração de transdutores HPI GP6, por meio da CQeI com um transdutor HPI GP8 como referência, transdutor piezoelétrico com fundo de escala de 800 MPa, constituído também de fosfato de gálio. O processo de calibração resume-se à pressurização do cilindro até o nível de pressão desejado e a medição em níveis intermediários de pressão definidos pelo usuário, com duração total de 18 s, aproximadamente. Portanto, para a simulação foi considerado um degrau de pressão com duração aproximada de 20 s entre a pressão inicial correspondente à atmosférica, até 600 MPa, fundo de escala do transdutor HPI GP6. A partir das simulações em LTspice, foram obtidas as respostas conforme a Figura 54.



Figura 54 - Respostas para as simulações de calibração quase-estática, com degrau de pressão positivo entre 0 e 600 MPa.

Os resultados são apresentados mais detalhadamente na Tabela 12, destacando as cargas máximas medidas e o erro com relação à carga teórica para um transdutor com sensibilidade piezoelétrica de 33 pC/MPa.

Constante	Resistor de	Carga máxima	<b>E</b> ma (9/)
de tempo (τ)	realimentação ( $R_f$ )	medida	Erro (%)
0,6385 <i>s</i>	1,06 GΩ	1838,82 pC	17 961.17 pC (90,71 %)
10 <i>s</i>	16,68 GΩ	12 003,44 pC	77 96,55 pC (39,38 %)
100 <i>s</i>	166,81 GΩ	18 187,95 pC	1612,05 pC (8,14 %)
1000 <i>s</i>	1,67 ΤΩ	19 573,31 pC	226,69 pC (1,14 %)
10 000 <i>s</i>	16,68 TΩ	19 784,21 pC	15,79 pC (0,08 %)
100 000 <i>s</i>	166,81 ΤΩ	19 812,27 pC	-12,27 pC (-0,06 %)

Analisando os resultados, é notável a discrepância entre a carga máxima medida e o valor de referência nos dois primeiros casos, com constantes de tempo de 0,6385 s e 10 s. Percebe-se também que a partir da constante de tempo de 10 000 s, o erro se torna bastante reduzido, indicando que as respectivas configurações do amplificador de carga são eficazes nestes casos, apresentando erros inferiores a 1 %.

## Avaliação de métodos de calibração indiretos

Conforme mencionado no capítulo 2, os métodos de calibração dinâmica indireta (CDI) e calibração quase-estática indireta (CQeI) são comumente utilizados nos processos de calibração de transdutores piezoelétricos destinados a ensaios de munições. O presente capítulo apresenta um estudo comparativo entre os dois processos de calibração, empregando instrumentos distintos, expondo ao final os resultados da comparação entre as incertezas do ajuste originadas por cada método.

Além disso, é apresentado um estudo comparativo entre as medições empregando cilindro de cobre e transdutores piezoelétricos, verificando a viabilidade de emprego de cilindros de cobre como materiais de referência.

## 5.1.

#### Método de calibração dinâmica indireta

A CDI, conforme já abordado anteriormente, se resume na medição de carga elétrica durante uma variação abrupta de pressão em um vaso fechado, onde são instalados um transdutor de referência e um transdutor em calibração. O resultado da medição de pressão por meio do transdutor de referência origina o valor de pressão supostamente verdadeiro, possibilitando determinar a sensibilidade piezoelétrica do transdutor em calibração.

O processo descrito é uma das possibilidades do TMS K9905D, apresentado na Figura 55, instrumento dedicado à calibração de transdutores de medição de pressão direta, como por exemplo os HPI GP6, e dos transdutores de medição de pressão por meio da dilatação do estojo da munição, os PCB *Conformal.* 



Figura 55 – TMS K9905D: equipamento destinado à calibração de transdutores piezoelétricos (The Modal Shop, Inc., 2016).

O TMS K9905D possui como instrumento de medição de pressão de referência o transmissor de pressão Viatran 345EGSPW, cuja leitura pode ser realizada pelo indicador destacado na Figura 55, ou por meio do software que acompanha o equipamento.

O processo de calibração desenvolvido com o TMS K9905D consiste na pressurização manual do sistema à medida que o operador gira o volante conectado ao cilindro de pressurização. No momento em que a pressão desejada é atingida, medida pelo transmissor de pressão e observada junto ao indicador da pressão de referência, o operador abre rapidamente a válvula de descarga, inserindo no processo o degrau positivo de pressão. Com a variação de pressão, a carga elétrica gerada por meio do efeito piezoelétrico direto é medida empregando-se um amplificador de carga PCB 443B102. Após uma série de medições em diferentes níveis de pressão, realiza-se o ajuste por mínimos quadrados, com o objetivo de determinar a sensibilidade piezoelétrica do transdutor.

Um aspecto relevante no processo de calibração descrito é que não há qualquer procedimento de verificação de falhas quanto à presença de bolhas de ar no sistema hidráulico ou até mesmo de verificação da presença de *drift* na cadeia de medição. Quanto às bolhas de ar, elas podem ser inseridas nas etapas de preparo, em virtude da alimentação do sistema com fluido, ou até mesmo em eventual manutenção, quando se exige a abertura das linhas.

Quanto ao *drift*, apesar do amplificador de carga PCB 443B102 possuir compensação automática, ela considera apenas o *drift* produzido pelo próprio instrumento, resultando em valores inferiores a 0,03 pC/s (PCB Piezotronics, Inc., 2021). Portanto, o surgimento de *drift* relacionado aos cabos de conexão do transdutor com o amplificador de carga, ou até mesmo originado no transdutor, não é considerado.

#### 5.2.

#### Método de calibração quase-estática indireta

O método CQel consiste, resumidamente, na medição contínua de carga elétrica conforme o sistema é pressurizado lentamente, sem a ocorrência de variações abruptas de pressão. As medições de carga elétrica e pressão de referência simultâneas são obtidas nos diferentes níveis predeterminados em um único ciclo de pressurização (Figura 30), diferentemente do método CDI, onde é necessário um ciclo de pressurização e despressurização do sistema para cada nível de pressão desejado (Figura 29).

O equipamento HPI B630, ilustrado na Figura 56, voltado para a calibração de transdutores piezoelétricos, emprega o método CQeI, juntamente com o transdutor de referência HPI GP8, que apresenta características muito semelhantes aos transdutores HPI GP2 e HPI GP6, sendo construído com o mesmo material piezoelétrico, o fosfato de gálio, tendo fundo de escala de 800 MPa.



Figura 56 – Equipamento de calibração de transdutores HPI B630 com: (a) o transdutor de referência e; (b) o transdutor em calibração instalados no cilindro hidráulico.

Este equipamento é comercializado juntamente com o sistema de aquisição, composto por amplificador de carga com dois canais, conversor A/D, e o software HPI B3000, que, além de processar os dados oriundos dos instrumentos de aquisição, controla o cilindro hidráulico automatizado. O procedimento de calibração se inicia com uma verificação do *drift* presente na cadeia de medição por meio da medição de carga com o cilindro despressurizado. De acordo com o fabricante, o *drift* relacionado ao amplificador de carga é inferior a 0,05 pC/s (HPI Gmbh, 2015) e, na verificação, é indicado que o valor obtido em 2 s seja inferior a 1 pC. Caso o valor seja superior, recomenda-se a substituição dos cabos de conexão do transdutor com o amplificador de carga, ou até mesmo a limpeza e secagem dos mesmos (Slanina e Wynands, 2021).

A partir daí, mediante aprovação no teste de verificação de *drift*, o sistema poderá iniciar o processo de calibração com a pressurização do cilindro. O sistema HPI B3000, a partir de uma estimativa determinada pelo volume do cilindro e pelo deslocamento do êmbolo realizado pelo motor de passo, determina a pressão aproximada que está se desenvolvendo no processo. Com isso, o mesmo também verifica se a pressão medida pelo transdutor de referência equivale à pressão estimada pelo software. Na eventualidade de não haver correspondência, o software indica falha no processo, podendo ser atribuída ao um *drift* elevado, à existência de bolhas de ar no sistema ou a vazamento de óleo, devendo o procedimento de sangria ser realizado conforme o manual do usuário nos dois últimos casos (HPI Gmbh, 2015).

Ao final do processo de calibração, o software, a partir da pressão determinada pelo transdutor de referência, determina a sensibilidade do transdutor que está sendo calibrado, sua tabela de calibração com as pressões predeterminadas e os valores de carga elétrica correspondentes, a sensibilidade determinada pelo coeficiente angular do ajuste e o erro de linearidade obtido.

#### 5.3.

#### Comparação entre os métodos de calibração indireta

Visando à comparação entre os métodos CDI e CQeI, empregando-se os dois equipamentos apresentados (TMS K9905D e HPI B630) foram calibrados três transdutores HPI GP6, listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Transdutores utilizados na comparação entre os métodos. Modelo HPI GP6

Número de série	6336	6795	6931
Sensibilidade original	33,00 pC/MPa	33,84 pC/MPa	34,04 pC/MPa

Os resultados das calibrações dos transdutores empregando os dois métodos permitiram determinar não somente a sensibilidade, o desvio da sensibilidade original e o erro de linearidade, necessários para a classificação dos transdutores quanto à vida útil, mas também a incerteza do ajuste  $u_{fit}$  e a incerteza padrão da sensibilidade  $u_d$ , de acordo com as expressões (20) e (21), respectivamente.

## 5.3.1.

## Resultados da calibração dos transdutores pelo método CDI

Aplicando o método descrito no item 5.1, os transdutores foram calibrados em 8 (oito) níveis de pressão, variando de 50 MPa a 400 MPa, com duas replicatas em cada nível de pressão. A Tabela 14 apresenta os resultados para cada transdutor.

Tabela 14 - Resultado da calibração pelo método da CDI.

Transdutor	6336	6795	6931
Sensibilidade piezoelétrica (pC/MPa)	33,063	33,888	34,475
Desvio da sensibilidade original	0,19 %	0,14 %	1,28 %
Erro de linearidade máximo	3,46 %	-3,20 %	5,13 %
Incerteza do ajuste ( $u_{fit}$ ) (pC)	228,35	250,43	213,99
Incerteza do ajuste ( $u_{fit}$ ) (%)	1,15 %	1,23 %	1,03 %
Incerteza padrão da sensibilidade $(u_d)$ (pC/MPa)	0,2261	0,2473	0,2113

A partir dos resultados obtidos, observa-se que, de acordo com o método CDI, como o erro de linearidade obtido foi superior ao limite determinado pela base normativa (± 1 %), os três transdutores calibrados seriam reprovados. Além disso, empregando-se o critério apresentado na seção 3.4, sugerindo o limite da incerteza do ajuste de 0,5 % para a aprovação dos transdutores piezoelétricos, os resultados das calibrações corroboram a reprovação dos transdutores.

## 5.3.2.

## Resultados da calibração dos transdutores pelo método CQel

Utilizando a metodologia apresentada no item 5.2, os três transdutores foram calibrados pelo método CQeI. As cargas elétricas foram medidas em 5 (cinco) níveis de pressão: 50 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa e 400 MPa. Para cada nível, foram obtidas cinco replicatas. A Tabela 15 mostra os resultados das calibrações.

Tabela 15 – Resultado da calibra	ação pelo método CQel.
----------------------------------	------------------------

Transdutor	6336	6795	6931
Sensibilidade piezoelétrica (pC/MPa)	32,169	33,727	34,183
Desvio da sensibilidade original	2,52 %	0,33 %	0,42 %
Erro de linearidade máximo	0,28 %	0,92 %	-0,69 %
Incerteza do ajuste ( $u_{fit}$ ) (pC)	21,66	46,93	45,29
Incerteza do ajuste $(u_{fit})$ (%)	0,11 %	0,23 %	0,22 %
Incerteza padrão da sensibilidade $(u_d)$ (pC/MPa)	0,0176	0,0382	0,0378

Pelos resultados, verifica-se que, os transdutores seriam aprovados pelos critérios estabelecidos pela base normativa. O transdutor GP6 6336, apesar de apresentar maior desvio da sensibilidade original, obteve na calibração menor erro de linearidade e menor incerteza que os demais. Nota-se também que as incertezas do ajuste  $u_{fit}$  da curva e da sensibilidade  $u_d$  apresentam valores inferiores aos obtidos com o método CDI.

As curvas de calibração dos três transdutores determinadas pelos métodos CDI e CQeI são mostradas nas Figura 57, Figura 58 e Figura 59.



Figura 57 – Curva de calibração do transdutor HPI GP6 6336.



Figura 58 – Curva de calibração do transdutor HPI GP6 6795.



Figura 59 – Curva de calibração do transdutor HPI GP6 6931.

O gráfico da Figura 60 mostra os erros de linearidade obtidos para cada ponto de calibração de acordo com o método CDI. Observa-se que, para todos os transdutores, existem pelo menos 4 (quatro) pontos com erro de linearidade maior que ±1 %.



Figura 60 - Erro de linearidade para cada medição de pressão no método CDI.

A Figura 61 mostra os erros de linearidade calculados para cada ponto de calibração de acordo com o método CQeI. Observa-se que a linearidade se encontra dentro da faixa de ±1 %.



Figura 61 – Erro de linearidade para cada medição de pressão no método CQel.

## 5.3.3.

#### Análise comparativa entre os métodos de calibração indireta

No processo de avaliação da conformidade de munições, a calibração de transdutores piezelétricos tem participação fundamental, pois determinará a sensibilidade piezoelétrica do instrumento, além de permitir a classificação dos transdutores quanto a sua prestabilidade, de acordo com o máximo erro de linearidade.

Conforme os resultados da comparação entre os métodos CDI e CQeI, todos os transdutores seriam reprovados segundo a calibração com o primeiro método. Como destacado anteriormente, o equipamento TMS K9905D não é automatizado, sendo a pressurização seguida da despressurização executadas manualmente pelo operador. Além disso, não há nenhum procedimento de verificação de *drift* na cadeia de medição ou do sistema hidráulico visando à identificação de vazamentos ou da presença de bolhas de ar. Provavelmente, tais aspectos podem estar diretamente relacionados à maior incerteza do ajuste obtida com o método CDI, em relação ao método CQeI<sup>2</sup>.

O método CQeI utilizado na HPI B630 possui um procedimento automatizado de verificação de *drift* e do sistema hidráulico, além da pressurização ser realizada por um motor controlado por software, reduzindo a influência do operador na calibração. Tais procedimentos podem ser considerados como ações que visam "prevenir ou reduzir possíveis falhas nas atividades de laboratório" (ISO, 2017), risco que deve ser levado em consideração em atendimento ao requisito 8.5 da norma ISO/IEC 17025:2017, "Ações para abordar riscos e oportunidades".

O principal fato a ser destacado na comparação apresentada é que, apesar de serem aceitos pelas três organizações normalizadoras, os dois métodos apresentaram resultados distintos, sendo os três transdutores usados na comparação reprovados segundo o método CDI. Uma falsa reprovação imputaria elevados custos de reposição dos transdutores, já que a base normativa determina a substituição dos mesmos. Por outro lado, a aprovação indevida pode significar a utilização de um transdutor com funcionamento impróprio, ou seja, com

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Foi produzido artigo abordando a comparação apresentada na seção 5.3. O artigo intitulado: "Evaluation of calibration methods of piezoelectric transducers for dynamic pressure measurement in ballistics tests" foi apresentado no Congresso Internacional de Metrologia Mecânica – CIMMEC 2023, realizado na cidade de Itaipava-RJ, no período de 28 a 30 de novembro de 2023, e encontra-se localizado no **Anexo B**.

erro de linearidade superior ao limite determinado pela base normativa, ou até mesmo o uso de sensibilidade inadequada, inserindo grande parcela de erro sistemático nas medições de pressão de munições.

Um fato que não deve ser desconsiderado é que ambos os equipamentos de calibração estão instalados em laboratórios de ensaios, peculiaridade permitida pelas três organizações normalizadoras. Neste caso, é comum que técnicos sejam deslocados de sua atividade principal, ou seja, os ensaios balísticos, para a execução das calibrações. Tal prática deve ser adotada com cautela, pois os processos de calibração não podem ser considerados atribuições secundárias, isto é, com menor importância que a atividade finalística dos laboratórios de ensaio. Além disso, o requisito 6.2 da ISO/IEC 17025:2017 estabelece que o laboratório é o responsável por assegurar que todo o seu pessoal tenha competência para realizar as atividades pelas quais é responsável (ISO, 2017).

Diante desta realidade, percebe-se que o equipamento automatizado, utilizado na CQeI, é o mais indicado, uma vez que realiza a pressurização automaticamente, sem a influência do operador, além de deter de mecanismos de identificação de falhas no sistema, como a presença de *drift* considerável, bolhas de ar e vazamento no sistema hidráulico. Tais ferramentas, apesar de encarecer o equipamento, são fundamentais para a manutenção da confiabilidade dos resultados das calibrações.

#### 5.4.

#### Checagem da calibração de transdutores

No caso dos dois métodos comparados, embora o CQeI tenha apresentado menores incertezas do ajuste e incertezas da sensibilidade, neste caso não é possível determinar qual procedimento está correto. Como os equipamentos não possuem a recalibração adequada, ou seja, dentro dos prazos determinados pelos respectivos fabricantes e pela base normativa dos ensaios de munições, não é possível garantir que qualquer uma das calibrações realizadas pode ser adotada por um laboratório acreditado pela ISO/IEC 17025:2017.

Diante dos resultados, a principal questão a ser resolvida é a redução do risco de rejeição indevida dos transdutores ou seu uso inadequado em ensaios balísticos. A rejeição indevida pode gerar um aumento nos custos do laboratório com a imposição de aquisição de novos transdutores piezoelétricos. A aprovação inadequada pode significar o uso de um transdutor com funcionamento inadequado, ou seja, com erro de linearidade superior ao limite determinado pela

base normativa, ou mesmo o uso de sensibilidade inadequada, inserindo grande parcela de erro sistemático nas medições de pressão transiente.

Para garantir a validade das calibrações dos transdutores piezoelétricos, seria necessária a recalibração periódica, tanto do transmissor de pressão, no caso da CDI, quanto do transdutor piezoelétrico de referência, no caso da CQeI, além do amplificador de carga.

Visando à manutenção da confiabilidade dos equipamentos envolvidos na calibração de transdutores piezoelétricos e nos ensaios de munições, além do acompanhamento do desempenho metrológico dos instrumentos, os laboratórios poderiam realizar procedimentos de checagem, principalmente como etapa precedentes aos ensaios (Inmetro, 2018). A adoção de tal prática pode servir de base para estudos relacionados à periodicidade adequada de recalibração dos transdutores piezoelétricos e do amplificador de carga.

No caso dos amplificadores de carga, o procedimento de calibração consiste no emprego de sistemas semelhantes ao mostrado na Figura 43, onde uma fonte de tensão elétrica e um capacitor de referência são empregados de forma análoga ao que foi realizado na caracterização do amplificador de carga, descrita na seção 4.1.2, ou seja, a fonte de tensão gera a curva de tensão de entrada, que, por sua vez, é convertida em carga elétrica pelo capacitor de referência conectado em série com o amplificador de carga (Volkers e Bruns, 2014).

Como método de checagem, o procedimento de calibração dos amplificadores de carga certamente pode ser replicado pelos laboratórios de ensaios de munições. Obviamente, a rastreabilidade será garantida mediante as recalibrações periódicas do amplificador de carga junto a laboratórios de calibração acreditados, mas a simples adoção do procedimento de checagem proporcionaria maior confiabilidade metrológica aos resultados dos ensaios.

Já para os transdutores piezoelétricos, não há instrumentos de referência que viabilizem a checagem. Uma outra forma de verificar o correto funcionamento dos transdutores piezoelétricos é a medição de pressão transiente empregando outras técnicas de medição de pressão, como por exemplo por meio de *strain gauges* ou por *copper crushers*. O primeiro método necessita de maior desenvolvimento com o objetivo de proporcionar medições de pressão mais confiáveis. Já o segundo, método mecânico, é largamente utilizado, sobretudo em medições em campo, principalmente em medições de pressão de munições pesadas.

#### 5.4.1.

# Comparação entre os métodos de medição mecânico e eletromecânico

Estudos indicam que o método eletromecânico, por meio de transdutores piezoelétricos, apresenta maior confiabilidade metrológica do que as medições mecânicas, empregando *copper crushers* (Wang, Li e Kong, 2016; Zahid *et al.*, 2017). Entretanto, uma comparação entre os métodos seria útil como forma de verificar se é possível estabelecer alguma relação entre eles.

Para isso, foram realizadas três séries de dez disparos com munição comercial 7,62 mm x 51 mm comum, empregando simultaneamente os transdutores piezoelétricos calibrados e o cilindro de cobre. Para a medição de carga elétrica oriunda dos transdutores piezoelétricos e o processamento dos dados, foi utilizado o sistema HPI B217, juntamente com o software HPI B3000. As cargas elétricas foram convertidas em pressão por meio das sensibilidades original e daquelas determinadas pela CDI e pela CQeI. Portanto, foram obtidos três valores distintos de pressão, de acordo com a sensibilidade determinada em cada calibração. A Tabela 16 mostra as respectivas sensibilidades para cada transdutor piezoelétrico utilizado.

Sensibilidade	6336	6795	6931	
Original (pC/MPa)	33,00	33,84	34,04	
CDI (pC/MPa)	33,063	33,888	34,475	
CQel (pC/MPa)	32,169	33,727	34,183	

Tabela 16 – Sensibilidades piezoelétricas de cada transdutor utilizado na comparação entre métodos de medição.

A Figura 62 mostra o aparato experimental empregado para as medições simultâneas. Neste caso, no provete, dotado de dois orifícios posicionados na boca do estojo (*case mouth*) para medições simultâneas, foram instalados, no orifício superior, o sistema para medição mecânica por *copper crusher* e, no orifício à direita, o transdutor piezoelétrico HPI GP6.



Figura 62 – Sistema empregado nas medições simultâneas de pressão: (a) instalação sistema de medição mecânica por cilindro de cobre (*copper crusher*) e; (b) instalação do transdutor piezoelétrico HPI GP6.

As medições de pressão com os cilindros de cobre foram determinadas por meio das tabelas de conversão fornecidas pelos fabricantes (Anexo C). Para a determinação do comprimento final dos cilindros de cobre, foi empregado um micrômetro digital INSIZE modelo 3101 com resolução de 0,001 mm. O procedimento foi realizado em duas etapas, consistindo na medição do comprimento inicial do cilindro de cobre e, posteriormente ao disparo da munição, na medição do comprimento final. Portanto, a entrada da tabela de conversão foi a deformação produzida no cilindro de cobre.

## 5.4.2.

#### Resultados

A partir da montagem descrita, foram realizados dez disparos para cada transdutor, cujos resultados estão indicados na Tabela 17 para o transdutor HPI GP6 6336, na

Tabela 18 para o transdutor HPI GP6 6795 e na Tabela 19 para o transdutor HPI GP6 6931. As tabelas mostram as medições de pressão por *copper crusher* e as medições com o transdutor piezoelétrico, considerando as diferentes calibrações realizadas, além de destacar a diferença percentual entre os valores de pressão obtidos pelos métodos de medição.
Tabela 17 – Resultado das medições	simultâneas de	pressão na câ	imara empregano	do o cilindro de
cobre e o transdutor piezoelétrico HPI	GP6 6336, com	as respectivas	s diferenças perc	entuais relativa
à medição por cilindro de cobre.				

GP6 6336	Copper crusher (MPa)	CDI (MPa)		CQel (MPa)		Original (MPa)		
1	293,027	250,333	-14,57 %	257,290	-12,20 %	250,811	-14,41 %	
2	282,006	242,326	-14,07 %	249,060	-11,68 %	242,788	-13,91 %	
3	262,507	231,088	-11,97 %	237,510	-9,52 %	231,529	-11,80 %	
4	236,776	210,578	-11,06 %	216,430	-8,59 %	210,980	-10,89 %	
5	334,682	294,622	-11,97 %	302,810	-9,52 %	295,185	-11,80 %	
6	345,223	312,301	-9,54 %	320,980	-7,02 %	312,897	-9,36 %	
7	379,566	324,560	-14,49 %	333,580	-12,12 %	325,180	-14,33 %	
8	340,791	300,343	-11,87 %	308,690	-9,42 %	300,917	-11,70 %	
9	392,126	317,282	-19,09 %	326,100	-16,84 %	317,888	-18,93 %	
10	343,519	301,842	-12,13 %	310,230	-9,69 %	302,418	-11,96 %	

Tabela 18 - Resultado das medições simultâneas de pressão na câmara empregando o cilindro de
cobre e o transdutor piezoelétrico HPI GP6 6795, com as respectivas diferenças percentuais relativa
à medição por cilindro de cobre.

GP6 6795	Copper crusher (MPa)	CDI (MPa)		CQel	CQel (MPa)		Original (MPa)		
1	351,360	317,455	-9,65 %	318,970	-9,22 %	317,905	-9,52 %		
2	372,281	323,526	-13,10 %	325,070	-12,68 %	323,985	-12,97 %		
3	371,958	326,571	-12,20 %	328,130	-11,78 %	327,034	-12,08 %		
4	343,178	316,360	-7,81 %	317,870	-7,37 %	316,809	-7,68 %		
5	338,064	311,762	-7,78 %	313,250	-7,34 %	312,204	-7,65 %		
6	328,920	292,384	-11,11 %	293,780	-10,68 %	292,799	-10,98 %		
7	326,010	301,939	-7,38 %	303,380	-6,94 %	302,367	-7,25 %		
8	311,787	284,741	-8,67 %	286,100	-8,24 %	285,145	-8,54 %		
9	336,290	304,228	-9,53 %	305,680	-9,10 %	304,659	-9,41 %		
10	327,214	289,090	-11,65 %	290,470	-11,23 %	289,500	-11,53 %		

Tabela 19 – Resultado das medições simultâneas de pressão na câmara empregando o cilindro	de
cobre e o transdutor piezoelétrico HPI GP6 6931, com as respectivas diferenças percentuais relat	iva
à medição por cilindro de cobre.	

GP6 6931	Copper crusher (MPa)	CDI (MPa)		CQel	CQel (MPa)		Original (MPa)	
1	326,927	283,518	-13,28 %	285,940	-12,54 %	287,141	-12,17 %	
2	320,948	300,592	-6,34 %	303,160	-5,54 %	304,434	-5,15 %	
3	312,131	289,745	-7,17 %	292,220	-6,38 %	293,448	-5,99 %	
4	315,644	284,708	-9,80 %	287,140	-9,03 %	288,346	-8,65 %	
5	319,070	284,599	-10,80 %	287,030	-10,04 %	288,236	-9,66 %	
6	329,264	287,861	-12,57 %	290,320	-11,83 %	291,540	-11,46 %	
7	319,328	289,606	-9,31 %	292,080	-8,53 %	293,307	-8,15 %	
8	347,143	313,799	-9,61 %	316,480	-8,83 %	317,810	-8,45 %	
9	342,003	304,737	-10,90 %	307,340	-10,14 %	308,631	-9,76 %	
10	320,669	282,061	-12,04 %	284,470	-11,29 %	285,665	-10,92 %	

De acordo com as medições simultâneas, percebe-se que a medição de pressão pelo método mecânico resulta em valores superiores às pressões medidas pelos transdutores piezoelétricos.

Para uma melhor análise, é possível observar os dados graficamente, obtendo o ajuste pelo método dos mínimos quadrados com os valores das medições por *copper crusher* na ordenada e por transdutor piezoelétrico na abscissa, além do cálculo do coeficiente de determinação, cuja expressão será dada por:

$$r^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} [(x_{i} - \bar{x})(y_{i} - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \bar{x})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}}}\right)^{2}$$
(48)

Os valores da abscissa são determinados por meio da divisão da carga elétrica ( $Q_i$ ) pela sensibilidade piezoelétrica (d) determinada nas diferentes calibrações. Portanto, tem-se que:

$$x_i = \frac{Q_i}{d} \tag{49}$$

Substituindo a expressão (49) na equação (48), o coeficiente de determinação passa a ser expresso por:

$$r^{2} = \left(\frac{\frac{1}{d} \cdot \sum_{i=1}^{n} [(Q_{i} - \bar{Q})(y_{i} - \bar{y})]}{\frac{1}{d} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i} - \bar{Q})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}}}\right)^{2}$$
(50)

Simplificado a expressão (50), a sensibilidade piezoelétrica é eliminada, resultando na expressão:

$$r^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} [(Q_{i} - \bar{Q})(y_{i} - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i} - \bar{Q})^{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}}}\right)^{2}$$
(51)

Portanto, para cada uma das três séries de medições simultâneas de pressão, o coeficiente de determinação será único, independente da sensibilidade piezoelétrica.

As Figura 63, Figura 64 e Figura 65 mostram os gráficos de pressão medida por cilindro de cobre versus pressão medida por transdutor piezoelétrico, juntamente com o ajuste linear determinado para cada transdutor e suas diferentes sensibilidades piezoelétricas listadas na Tabela 16, além dos respectivos coeficientes de determinação.



Figura 63 – Comparação entre pressão medida por cilindro de cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico **HPI GP6 6336**, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente.



Figura 64 – Comparação entre pressão medida por cilindro de cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico **HPI GP6 6795**, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente.



Figura 65 – Comparação entre pressão medida por cilindro de cobre versus pressão medida pelo transdutor piezoelétrico **HPI GP6 6931**, com as diferentes sensibilidades determinadas pelos métodos CDI e CQeI, além da sensibilidade original, respectivamente.

Aplicando a raiz quadrada no coeficiente de determinação  $(r^2)$  é possível determinar o coeficiente de correlação amostral (r), cujos valores são de 0,977, 0,922 e 0,763, para os transdutores 6336, 6795 e 6931, respectivamente.

De acordo com Devore (2021), uma regra informal quanto às faixas de valores para o coeficiente de correlação amostral indicam a classificação da correlação como fraca, moderada ou forte, conforme a Tabela 20.

Fabela 20 – Escala de correlaç	ão (Devore, 2021).	
Fraca	Moderada	Forte
$r \leq 0,5$	$0.5 \le r \le 0.8$	r ≥ 0,8

Portanto, de acordo com a regra apresentada, o coeficiente de correlação amostral calculado para as medições com *copper crusher* e o transdutor HPI GP6 6931 indica uma correlação moderada. Em contrapartida, os coeficientes de correlação calculados para os demais transdutores indicam uma forte correlação. Além do coeficiente de correlação, a partir dos dados e dos ajustes, é possível calcular as incertezas do ajuste para cada caso, com os respectivos percentuais considerando o fundo de escala dos transdutores HPI GP6 de 600 MPa, conforme a Tabela 21. Os valores de incerteza do ajuste diferem muito pouco entre as diferentes sensibilidades piezoelétricas empregadas. Desta forma, os valores apresentados são a aproximação considerando duas casas decimais.

Tabela 21 – Incerteza do ajuste considerando a regressão linear entre os valores de pressão obtidos pelos métodos mecânico, por cilindro de cobre, e eletrônico, por transdutor piezoelétrico, além do percentual considerando fundo de escala de 600 MPa do transdutor.

Transdutor	6336	6795	6931
u <sub>fit</sub>	11,45 MPa (1,91 %)	8,08 MPa (1,35 %)	7,77 MPa (1,29 %)

Levando-se em consideração a aproximação de 0,5 % para o limite da incerteza do ajuste estimada no Capítulo 3, onde foi apresentado o estudo relacionado aos certificados de calibração de transdutores piezoelétricos, desejase que em uma eventual utilização de diferentes metodologias para a checagem da calibração de transdutores piezoelétricos, sejam obtidas incertezas do ajuste menores que o limite, isto é, 0,5 %. Portanto, a partir das incertezas do ajuste calculadas com os dados obtidos nas medições de pressão simultâneas, cujos valores variam entre 1,29 % e 1,91 %, conclui-se que o método não é satisfatório.

Desta forma, os dados mostram que é possível estabelecer uma relação linear positiva entre os dois métodos de medição, entretanto, não seria uma metodologia adequada para fins de checagem da calibração dos transdutores piezoelétricos. Apesar dos resultados dos casos dos transdutores 6336 e 6975 apresentarem correlação forte, os elevados erros calculados entre os dois métodos, além das incertezas do ajuste maiores que 1 % em todos os casos, inviabilizam a determinação de qual valor de sensibilidade piezoelétrica estaria mais próximo do valor verdadeiro. Neste caso, para fins práticos, o uso do cilindro de cobre certamente seria útil em uma checagem de funcionamento da cadeia de mediação de pressão transiente, indicando a ordem de grandeza do mensurando.

Diante do exposto até aqui e, principalmente, diante dos resultados de calibração apresentados, como fruto do estudo realizado, foi possível resumir em um fluxograma os principais aspectos a serem considerados na calibração, conforme a Figura 66, que mostra a sequência dos processos envolvidos na calibração de transdutores piezoelétricos.



Figura 66 – Fluxograma do processo de calibração de transdutores piezoelétricos, segundo os métodos de calibração dinâmica e quase-estática.

### Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Nesta dissertação realizou-se a avaliação dos métodos de calibração de transdutores piezoelétricos empregados em medições de pressão transiente, aplicados em ensaios de munições leves, mais especificamente nos ensaios de pressão normalizados pela CIP e SAAMI, no caso de munições comerciais, e nos ensaios EPVAT, de acordo com a OTAN, para munições de uso militar.

Com isso, a presente pesquisa contribuiu sobretudo com o aprofundamento do conhecimento técnico relacionado à calibração de transdutores piezoelétricos usados em ensaios de munição, colaborando para o atendimento dos requisitos normativos, tanto aqueles ligados às normas técnicas voltadas para ensaios de munição, quanto os relacionados à norma ISO/IEC 17025:2017, voltada para a acreditação de laboratórios.

A inexistência de rastreabilidade nos métodos de calibração de instrumentos de medição de pressão transiente, gerando a necessidade de adaptação de métodos de calibração de instrumentos de medição de pressão estática, além da falta de normalização relacionada à calibração de transdutores piezoelétricos e ao cálculo de incerteza de medição, são os principais entraves para a comprovação da rastreabilidade de medição e para o cálculo de incerteza, requisitos da norma ISO/IEC 17025:2017.

Segundo a base normativa de munições leves, caracteriza-se como resultado da calibração a determinação da sensibilidade piezoelétrica e do erro de linearidade, parâmetro que determinará se o transdutor estará apto ao uso em ensaios. O Capítulo 3 apresentou o estudo a respeito da adoção da incerteza do ajuste como principal parâmetro de determinação da prestabilidade dos transdutores piezoelétricos, cujo valor limite equivalente à ±1 % do erro de linearidade seria de 0,5 % para a incerteza do ajuste. De acordo com os resultados obtidos, a partir do cálculo da incerteza do ajuste, que necessariamente deve ser empregado nos cálculos de incerteza de medição, demonstrou-se a possibilidade de adoção do parâmetro em detrimento do erro de linearidade para a classificação quanto à serventia dos transdutores piezoelétricos.

Além disso, nos casos em que o ajuste é realizado para a curva com coeficiente linear nulo, verificou-se que há significância estatística no intercepto diferente de zero, indicado pelo teste estatístico realizado com dados oriundos de certificados de calibração de transdutores piezoelétricos. Com isso, nota-se que há a necessidade de investigação da relação do coeficiente linear com a presença de *drift* na cadeia de medição utilizada nas calibrações.

No que diz respeito à cadeia de medição adotada tanto nas calibrações quanto nos ensaios de medição de pressão de munições, no Capítulo 4 foi apresentada uma metodologia visando à caracterização e à modelagem dos principais componentes da cadeia de medição de pressão transiente, isto é, o transdutor piezoelétrico e o amplificador de carga. A modelagem demostrou eficácia, viabilizando a simulação de diferentes configurações da instrumentação, sobretudo permitindo a avaliação da influência do amplificador de carga nas medições de carga elétrica dinâmica e quase-estática, a previsão dos erros associados às variações da constante de tempo e a influência da duração dos eventos dinâmicos de variação de pressão inseridos nas calibrações dinâmicas.

Com relação à metodologia, ela pode ser utilizada para diferentes transdutores piezoelétricos empregados não somente em ensaios de medição de pressão de munições, mas também em outras áreas de aplicação. No caso dos ensaios balísticos, é viável a modelagem de toda a gama de transdutores com tal finalidade, uma vez que o universo se restringe a poucos modelos certificados pelas organizações normalizadoras, que estão disponíveis no mercado.

Quanto às simulações realizadas por meio do modelo elétrico desenvolvido, verificou-se que a medição quase-estática de carga elétrica, ou seja, aquela em que o amplificador de carga é configurado com constante de tempo suficientemente grande, permitindo a medição de variações lentas de pressão, proporciona erros de medição inferiores a 1 %, para as constantes de tempo superiores a 10 000 s. Desta forma, é possível afirmar que tal configuração promove a melhoria na confiabilidade dos resultados de calibração, desde que o *drift* associado às medições quase-estáticas de carga elétrica seja monitorado durante a medição.

As variações de configuração da cadeia de medição de pressão transiente, sobretudo por meio do amplificador de carga, possibilitam a utilização de diversas metodologias de calibração de transdutores piezoelétricos. No Capítulo 5, foi apresentada uma comparação entre duas metodologias de calibração, empregando os equipamentos TMS K9905D, que realiza a CDI, e HPI B630, que executa a CQeI. Como resultado, verificou-se grande discrepância entre os erros

de linearidade e a incerteza do ajuste obtidos nos dois casos. Apesar de não ser possível determinar qual seria o resultado mais próximo do verdadeiro, uma vez que a CQel foi executada por sistema de pressurização automatizado, dotado de procedimentos de verificação da presença de *drift* e de vazamentos e/ou ar no sistema hidráulico, considera-se que o resultado deste método seja mais confiável, corroborando com incertezas do ajuste consideravelmente menores que as obtidas com a CDI.

Com isso, no caso de aplicação das metodologias de calibração em laboratórios de ensaios, visando a maior confiabilidade metrológica dos resultados das calibrações, é indicado o uso de equipamentos dotados dos mecanismos automatizados de pressurização e, nos casos da CDI, despressurização, além dos procedimentos de verificação de *drift* e do sistema hidráulico, indicando qualquer anomalia que possa interferir nos resultados das calibrações. Tal investimento, além de proporcionar maior comodidade por conta da automatização, pode contribuir sobremaneira para o melhor uso dos transdutores piezoelétricos, evitando reprovações indevidas e reduzindo os erros de medição nos ensaios de medição de pressão de munições.

As considerações a respeito dos erros associados à configuração da constante de tempo, além dos resultados obtidos com o método que empregou verificação de *drift* e do sistema hidráulico, e a determinação do valor limite para a incerteza do ajuste contribuem, de certa forma, para a melhoria na confiabilidade metrológica dos resultados de calibrações de transdutores piezoelétricos usados em ensaios balísticos.

Diante dos resultados da comparação entre os métodos CDI e CQeI, houve a tentativa de utilização do método de medição mecânica, por meio de *copper crushers*, como forma de metodologia de checagem. No experimento, o principal objetivo foi comparar os resultados de medições simultâneas e buscar determinar alguma relação entre os métodos de medição mecânico e eletrônico. Para isso, foram realizadas medições simultâneas de pressão transiente em munições comerciais, cujo resultado, apesar de indicar a existência de correlação entre as medições, justificada pelo mensurando comum aos dois instrumentos, indicou a impossibilidade de adoção da medição simultânea como forma de checagem das calibrações dos transdutores piezoelétricos.

Quanto às metodologias adotadas para a calibração de transdutores piezoelétricos, esta pesquisa não se restringiu aos métodos indiretos. Houve a tentativa de construção de um aparato experimental similar ao utilizado na calibração direta de transdutores. Para isso, foi empregado um peso morto DH

Bundenberg 580HX, com faixa de calibração entre 1 MPa e 120 MPa, além do amplificador de carga PIEZO FILM LAB PRE-AMPLIFIER 1007214-3. Para os ensaios foi instalada uma válvula na saída do peso morto, visando produzir a rápida variação de pressão por meio de sua abertura.

O objetivo dos ensaios foi verificar a viabilidade da calibração em faixas menores de pressão, o que poderia proporcionar redução de custos na construção de equipamentos destinados à calibração direta de transdutores piezoelétricos. Os resultados não foram apresentados nesta dissertação, pois houve a suspeita de atenuação do sinal de resposta por parte do amplificador de carga, e devido ao sistema de válvulas instalado na saída do peso morto não proporcionar a variação de pressão adequada à calibração desejada. Além de apresentar vazamento, a manipulação do sistema de válvulas causava oscilações nas massas padrão do peso morto, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

Diante dos principais aspectos relacionados à avaliação dos métodos de calibração apresentados nesta dissertação, como desdobramento da pesquisa, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realização de estudo relacionado ao cálculo de incerteza em calibrações de transdutores piezoelétricos e ensaios de medição de pressão de munições leves, com o principal objetivo de fundamentar o aprimoramento da base normativa de munições leves e garantir a rastreabilidade das medições;
- Investigação da relação entre o coeficiente linear com a presença de *drift* na cadeia de medição utilizada em calibrações;
- Aplicação da modelagem em diferentes transdutores piezoelétricos, visando à completa caracterização dos transdutores certificados pelas organizações normalizadoras de munições leves;
- Aplicação da modelagem em outros amplificadores de carga disponíveis no mercado, visando à consolidação da metodologia e possibilitando a comparação entre diferentes equipamentos;
- Aprofundamento do conhecimento relacionado à medição de pressão por meio de strain gauges, viabilizando a comparação entre o método e a medição por transdutor piezoelétrico, além da análise da possibilidade de sua utilização como metodologia de checagem de instrumentos de medição de pressão transiente; e
- Estudo sobre a aplicabilidade da calibração de transdutores piezoelétricos empregando faixas de pressão menores que o fundo

de escala, levando em consideração não somente os métodos indiretos, mas principalmente os métodos diretos.

Por fim, cabe ressaltar que, para o cálculo de incerteza nas calibrações de transdutores piezoelétricos, citado como sugestão para trabalhos futuros, vale mencionar que deve ser considerada a utilização de, no mínimo, três replicatas para o cálculo de desvio padrão amostral. No caso do experimento em que realizou-se a comparação entre as metodologias CDI e CQeI, foram utilizadas apenas duas replicatas empregando o método dinâmico. Como o parâmetro utilizado para a avaliação dos métodos foi a incerteza do ajuste, a quantidade de duas replicatas em detrimento de três não produz efeitos relevantes sobre o parâmetro.

Em suma, a calibração é etapa fundamental para a realização de ensaios de medição de pressão de munições leves. Esta pesquisa teve como principal objetivo embasar os laboratórios de ensaio com conhecimento útil para o atendimento dos requisitos da norma ISO/IEC 17025:2017. As informações apresentadas visaram elucidar lacunas de conhecimento relacionadas às calibrações de transdutores piezoelétricos usados em ensaios de munições leves, com foco no aprimoramento das técnicas disponíveis na base normativa, pretendendo, principalmente, proporcionar a melhoria da confiabilidade metrológica dos resultados das calibrações e dos ensaios de medição de pressão transiente. ALCIATORE, David G. Introduction to mechatronics and measurement systems. [S. I.]: Tata McGraw-Hill Education, 2007.

ALKHFAJI, Saad S.; e GARVEY, Seamus D. Identification of piezo-electric actuator parameters using a simple test technique. *In*: ISMA 2010, 2010, Leuven, Belgium. **Anais** [...]. Leuven, Belgium: [*s. n.*], set. 2010.

ALNASSER, Emad. A novel low output offset voltage charge amplifier for piezoelectric sensors. **IEEE Sensors Journal**, [s. *l*.], v. 20, n. 10, p. 5360–5367, 15 maio 2020. ISSN 1530-437X, 1558-1748, 2379-9153. DOI 10.1109/JSEN.2020.2970839.

ANSI e IEEE. **IEEE Standard on Piezoelectricity: An American National Standard**. [*S. l.*: *s. n.*], 1988. ISBN 0-7381-2411-7. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=26560&isnumber=101 9. Acesso em: 27 abr. 2022.

ARNAU, Antonio; SOARES, David. Fundamentals of piezoelectricity. *In*: **Piezoelectric transducers and applications**. [*S. l.*]: Springer, 2008. p. 1–38.

BILGIÇ, E.; e DURGUT, Y. Effects of Waveform Model on Sensitivity Values of Transducers Used in Mechanical Dynamic Measurements. **Acta Physica Polonica A**, [*s. l.*], v. 128, n. 2B, B-267-B-271, ago. 2015. ISSN 0587-4246. DOI 10.12693/APhysPolA.128.B-267.

BRASIL. Decreto nº 24.602, de 06 de julho de 1934. Dispõe sobre instalação e fiscalização de fábricas e comércio de armas, munições, explosivos, produtos químicos agressivos e matérias correlatas. [*S. l.*: *s. n.*], 6 jul. 1934. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/atos/decretos/1934/d24602.html#:~:text=de creta%3A,Par%C3%A1grafo%20%C3%BAnico. Acesso em: 27 out. 2023.

BRASIL. Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019. Aprova o Regulamento de Produtos Controlados. [S. I.: s. n.], 27 out. 2019. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2019-2022/2019/decreto/D10030.htm. Acesso em: 27 out. 2022.

BROWNELL, Lloyd Earl; YORK, MW; SINDERMAN, R.; JACOB, Klaus; e ROBBINS, H. Absolute chamber pressure in center-fire rifles. [*S. l.*: *s. n.*], 1965.

CARLUCCI, Donald E.; e JACOBSON, Sidney S. **Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition**. [*S. l.*]: CRC Press, 2018. 642 p. Google-Books-ID: ZQazswEACAAJ. ISBN 978-1-138-05531-5.

CASTELEIRO-ROCA, J. L.; CALVO-ROLLE, J. L.; MEIZOSO-LOPEZ, M. C.; PIÑÓN-PAZOS, A.; e RODRÍGUEZ-GÓMEZ, B. A. New approach for the QCM

sensors characterization. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. *l*.], v. 207, p. 1–9, mar. 2014. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2013.12.002.

CHANGE, Nicholas D.; e RIGGIS, Michael T. **Conformal pressure transducer**. Concessão: 1976. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US4012940A/en?oq=us4%2c012%2c940. Acesso em: 5 maio 2022.

CIP. **Comprehensive Edition of Adopted C.I.P. Decisions**. Liege, Belgium: Comission Internationale Permanente, 2001.

COGHE, Frédéric; e ELKAROUS, Lamine. Comparison of piezoelectric and crusher measurements of chamber pressure with finite element modeling results. *In*: 2013. **International Symposium on Ballistics**. [*S. l.*: *s. n.*], 2013.

CURIE, Jacques; e CURIE, Pierre. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées. **Bulletin de la Société minéralogique de France**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 90–93, 1880. ISSN 0150-9640. DOI 10.3406/bulmi.1880.1564.

DEVORE, Jay L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 9. ed. [*S. l*.]: Cengage Learning, 31 jul. 2021. ISBN 978-85-221-2803-7.

DIMEFF, J.; CARSON, JA; e CHARTERS, AC. Piston-Type Strain Gauge for Measuring Pressures in Interior Ballistics Research. **Review of Scientific Instruments**, [s. *l*.], v. 26, n. 9, p. 879–883, 1955.

DOLAN, John W. Calibration curves, part 1: to b or not to b? Deciding on a zero intercept. **LC-GC North America**, [s. *l*.], v. 27, n. 3, 224+, mar. 2009. 224. ISSN 15275949.

EICHSTÄDT, Sascha; ESWARD, Trevor; e SCHÄFER, André. On the Necessity of Dynamic Calibration for Improved Traceability of Mechanical Quantities. *In*: 2015. **Anais** [...]. [*S. I.*: *s. n.*], ago. 2015.

ELKAROUS, L.; COGHE, F.; PIRLOT, M.; e GOLINVAL, J. C. Experimental techniques for ballistic pressure measurements and recent development in means of calibration. **Journal of Physics: Conference Series**, [*s. l*.], v. 459, p. 012048, 6 set. 2013. ISSN 1742-6588. DOI 10.1088/1742-6596/459/1/012048.

ELLISON, S. L. R.; FARRANT, Trevor J.; e BARWICK, Vicki. **Practical statistics** for the analytical scientist: a bench guide. 2nd ed ed. Cambridge, UK: RSC Publishing, 2009. 268 p. ISBN 978-0-85404-131-2.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Portaria nº 107 - EME, de 20 de outubro de 1970. Aprova e manda por em execução o Manual Técnico, T9-1903 -"ARMAZENAMENTO, CONSERVAÇÃO, TRANSPORTE E DESTRUIÇÃO DE MNUIÇÕES, EXPLOSIVOS E ARTIFÍCIOS". [S. I.: s. n.], 20 out. 1970. Disponível em: https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9467/1/EB40MT30552.pdf. Acesso em: 29 out. 2022.

FLYNN, Paul D. Some strain-gage applications to ballistic problems: Internal ballistic pressures and other parameters were determined from external-surface strain-gage measurements on several laboratory guns. **Experimental Mechanics**, [s. *l*.], v. 10, n. 7, p. 297–304, 1970.

GAUTSCHI, Gustav. Piezoelectric Sensors. *In*: **Piezoelectric Sensorics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. p. 73–91.

GREENER, William Wellington. **The Gun and Its Development**. [*S. l.*]: Cassell, 1899.

GUAN, Mingjie; e LIAO, Wei-Hsin. Studies on the circuit models of piezoelectric ceramics. *In*: International Conference on Information Acquisition, 2004., 2004, Hefei, China. International Conference on Information Acquisition, 2004. **Proceedings.** Hefei, China: IEEE, 2004. p. 26–31. ISBN 978-0-7803-8629-7. DOI 10.1109/ICIA.2004.1373314. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/1373314/. Acesso em: 23 out. 2023.

GÜNGÖR, Onur. An approach for optimization of the wall thickness (weight) of a thick-walled cylinder under axially non-uniform internal service pressure distribution. **Defence Technology**, [*s. l.*], v. 13, n. 2, p. 150–157, 1 abr. 2017. ISSN 22149147. DOI 10.1016/J.DT.2017.04.003.

HEINE, AJ; e ORLANDO, AF. A methodology for calibrating piezoelectric transducers for transient pressure measurements. *In*: 10 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2004, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ENCIT, 2004.

HJELMGREN, Jan. **Dynamic measurement of pressure. A literature survey**. Borås: Sveriges provnings- och forskningsinstitut (SP), 2002. ISBN 978-91-7848-925-1.

HPI GMBH. Operation Instructions B292UR EPVAT Receiver Unit. [S. I.: s. n.], 2007.

HPI GMBH. Operation Instructions B630 Calibration Unit. [S. I.: s. n.], 2015.

HPI GMBH. B217 Data Recorder and B3000 BWF - B217 Software Module: Operational Instructions. [s. l.], 2018.

ILAC. ILAC-G2:1994 - Traceability of Measurements. [S. I.]: ILAC, 1994.

INMETRO, I. P. Q. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012). [*S. l.*: *s. n.*], 2012. Citation Key: inmetro2012vocabulario.

INMETRO. Orientações gerais sobre os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 (DOQ-CGCRE-087). [S. *l*.]: Inmetro/Cgcre, 2018.

ISA e ANSI. Electrical transducer nomenclature and terminology. [S. *l*.]: Instrument Society of America, 1982. p. 15. ISBN 0-87664-113-3. Acesso em: 16 jun. 2022.

ISO. Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição. [*S. l.*: *s. n.*], 2008.

ISO. **ISO/IEC 17025 Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. [*S. l.*: *s. n.*], 2017.

JUNG, Walter G. (ed.). **Op Amp applications**. Norwood, Mass: Analog Devices, Inc, 2002. ISBN 978-0-916550-26-4.

KALKOMEY ENTERPRISES, LLC. How the Rifle and Handgun Fire. **Hunter-ed.com**. [*S. l.*: *s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www.hunter-ed.com/pennsylvania/studyGuide/How-the-Rifle-and-Handgun-Fire/20103901\_88408/. Acesso em: 30 ago. 2023.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Impedance Measurement Handbook: A guide to measurement technology and techniques. [S. I.]: Keysight Technologies Santa Rosa, CA, USA, 2016.

KISTLER GROUP. Charge Amplifier Type 5018A. [S. I.: s. n.], out. 2021.

KISTLER GROUP. Test & Measurement Pressure - Measurement equipment for demanding T&M applications. [S. I: s. n., s. d.

KNEUBUEHL, Beat P. **Wound Ballistics: Basics and Applications**. [*S. l.*]: Springer Science & Business Media, 14 jun. 2011. 514 p. Google-Books-ID: q4jzcfLhBcYC. ISBN 978-3-642-20356-5.

KREMPL. Quartz homeotypic gallium-orthophosphate-a new high tech piezoelectric material. *In*: 1994. **Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium ULTSYM-94**. [S. *I*.]: IEEE, 1994. p. 949–954 vol.2. ISBN 0-7803-2012-3. DOI 10.1109/ULTSYM.1994.401699.

KREMPL, P. W. Quartzhomeotypic gallium orthophosphate: A new high-tech piezoelectric crystal. **Ferroelectrics**, [s. *l*.], v. 202, n. 1, p. 65–69, out. 1997. ISSN 0015-0193. DOI 10.1080/00150199708213461.

KRYNITSKY, Alexander I. **Experiments on copper crusher cylinders**. [*S. l.*]: US Government Printing Office, 1921. (185).

LALLY, Jim; e METZ, Bob. **PCB Piezotronics - Conformal Sensor Measures Ammunition Pressure Through Cartridge Case**. [*S. l.*: *s. n.*], 2001. Acesso em: 17 out. 2022.

LAURILA, Mika-Matti et al. A fully printed ultra-thin charge amplifier for on-skin biosignal measurements. **IEEE Journal of the Electron Devices Society**, [s. *l*.], v. 7, p. 566–574, 2019. ISSN 2168-6734. DOI 10.1109/JEDS.2019.2915028.

MACK, Oliver. New procedures to characterize drift and non-linear effects of piezoelectric force sensors. *In*: 2001. **Proceedings of the IMEKO TC3 Conference. Istanbul, Turkey**. [*S. I.*]: Citeseer, 2001.

MEIER, Walter; ENGELER, Paul; e METZ, Robert. Defining Parameters for Ballistic High Pressure Sensors. **Transducer Workshop - Kistler Instrument Corporation**, [*s. l.*], jun. 2000.

Mosin-Nagant Factory Pressure Test Rifle. Diretor: Ian McCollum. [*S. I.: s. n.*], 20 nov. 2018. Disponível em: https://youtu.be/xZ8bGAyN8o0. Acesso em: 1 set. 2023.

MULHOLLAND, Mary; e HIBBERT, D. Brynn. Linearity and the limitations of least squares calibration. **Journal of Chromatography A**, [s. *l*.], v. 762, n. 1–2, p. 73–82, 1997.

NSO. AEP- 97: Multi-Caliber Manual of Proof And Inspection (M-CMOPI) For NATO Small Arms Ammunition. [S. I.: s. n.], out. 2020.

OVEN, Robert. Modified charge amplifier for stray immune capacitance measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. *I*.], v. 63, n. 7, p. 1748–1752, jul. 2014. ISSN 0018-9456, 1557-9662. DOI 10.1109/TIM.2014.2298673.

PALLAS, Areney. **Sensors and signal conditioning**. [*S. l.*]: John Wiley & Sons, 2012.

PCB PIEZOTRONICS. Model 117B25 - CONFORMAL BALLISTICS PRESSURE SENSOR - Installation and Operating Manual. [S. I.: s. n.], 2015.

PCB PIEZOTRONICS, INC. Model 443B102 Dual Mode Modular Signal Conditioner Card Installation and Operating Manual. [S. I.: s. n.], 2021.

SAAMI. Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Pistol and Revolver Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers (Z299.3). [S. I.: s. n.], 2015.

SALMINEN, J.; HÖGSTRÖM, R.; SAXHOLM, S.; LAKKA, A.; RISKI, K.; e HEINONEN, M. Development of a primary standard for dynamic pressure based on drop weight method covering a range of 10 MPa–400 MPa. **Metrologia**, [s. *l*.], v. 55, n. 2, p. S52–S59, 1 abr. 2018. ISSN 0026-1394, 1681-7575. DOI 10.1088/1681-7575/aaa847.

SAVAGE, Kathleen A.; e FREED, Greg. **Firearm Examiner Training - Pressure**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: https://projects.nfstc.org/firearms/module05/fir\_m05\_t10\_01.htm. Acesso em: 17 out. 2022.

SLANINA, O.; e WYNANDS, R. Measurement uncertainty of a measurement system for dynamic pressure in the kbar regime. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 32, n. 7, 1 jul. 2021. ISSN 0957-0233, 1361-6501. DOI 10.1088/1361-6501/abe47e. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/abe47e. Acesso em: 2 jun. 2023.

STUTZER, Diego et al. Characterization and modeling of a planar ultrasonic piezoelectric transducer for periodontal scalers. Sensors and Actuators A: 351. 2023. ISSN 09244247. DOI Physical. [s. *l.*], ν. mar. 10.1016/j.sna.2022.114131. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092442472200766X. Acesso em: 10 mar. 2023.

THE MODAL SHOP, INC. Model K9905D High Pressure Sensor Calibration System User Manual. [S. I.: s. n.], 2016.

THEODORO, Flavio Roberto Faciolla; REIS, Maria Luísa Collucci Da Costa; SOUTO, Carlos d'Andrade; e BARROS, Everaldo De. Measurement uncertainty of

a pressure sensor submitted to a step input. **Measurement**, [*s. l.*], v. 88, p. 238–247, jun. 2016. ISSN 02632241. DOI 10.1016/j.measurement.2016.03.043.

THOMSON, J. J. Piezo-electricity and its applications. **Engineering**, [s. l.], v. 107, p. 543–544, 1919.

TICHÝ, Jan; ERHART, Jiří; KITTINGER, Erwin; e PŘÍVRATSKÁ, Jana. Fundamentals of piezoelectric sensorics: Mechanical, dielectric, and thermodynamical properties of piezoelectric materials. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**, [s. *l*.], p. 1–207, 2010. ISBN 9783540439660. DOI 10.1007/978-3-540-68427-5.

VATTAPARAMBIL SREEDHARAN, Sreejith; TIWARI, Nachiketa; MATHUR, Girijesh; e DWIVEDI, Rituraj. Strain gauge-based method to determine in-cylinder projectile velocity and gas pressure. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, [s. *I*.], 2 set. 2023. ISSN 0309-3247, 2041-3130. DOI 10.1177/03093247231192732. Disponível em: http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03093247231192732. Acesso em: 4 set. 2023.

VOLKERS, Henrik; e BRUNS, Thomas. The influence of source impedance on charge amplifiers. **ACTA IMEKO**, [s. *l*.], v. 2, n. 2, p. 56, 15 jan. 2014. ISSN 2221-870X. DOI 10.21014/acta\_imeko.v2i2.81.

VUOLO, Jose Henrique. **Fundamentos da teoria dos erros**. 2. ed. rev. e ampl ed. São Paulo (SP): E. Blucher, 1996. ISBN 978-85-212-0056-7.

WANG, Fang; LI, Liping; e KONG, Deren. Uncertainty Analysis of Chamber Pressure Measurement Based on Standard Copper Cylinder. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, [s. *l*.], 1 jan. 2016. ISSN 1473-804X. DOI 10.5013/IJSSST.a.17.30.38. Disponível em: https://edas.info/doi/10.5013/IJSSST.a.17.30.38. Acesso em: 22 jun. 2023.

WATIKINS, Ken. Force, Load and Weight Sensors. *In*: WILSON, Jon S. (ed.). **Sensors Technology Handbook**. [*S. I.*]: Newnes, 2005. p. 255–269.

ZAHID, Muhammad Zubair; BUTT, Shahid Ikramullah; IQBAL, Tauqeer; EJAZ, Syed Zohaib; e FAPING, Zhang. Nonlinear Material Behavior Analysis under High Compression Pressure in Dynamic Conditions. **International Journal of Aerospace Engineering**, [*s. l.*], v. 2017, p. 1–15, 2017. ISSN 1687-5966, 1687-5974. DOI 10.1155/2017/3616932.

ZHANG, Ying; XU, Limei; GU, Jiaqi; e HU, Hong. The electrical performance analysis of piezoelectric micromachine ultrasound transducer for audio directional loudspeaker. *In*: 2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE), 2008, Phuket, Thailand. **2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering**. Phuket, Thailand: IEEE, dez. 2008. p. 812–816. ISBN 978-0-7695-3504-3. DOI 10.1109/ICCEE.2008.43.

ZHONG, Xinyi; e LAM, Sang. Perpetual-operation frequency response and equivalent circuit modelling of piezoelectric ultrasonic atomizer devices. *In*: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2015, Taipei, Taiwan. **2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**. Taipei, Taiwan: IEEE, out. 2015. p. 1–4. ISBN 978-1-4799-8182-3. DOI 10.1109/ULTSYM.2015.0211.

# Apêndice A – Resultados da avaliação do ajuste em certificados de calibração

Transduter	Intercepto nulo				Intercepto não nulo						
Transoutor	Data	d (pC/MPa)	$u_d$ (pC/MPa)	$u_{fit}$ (pC)	L	d (pC/MPa)	u <sub>d</sub> (рС/МРа)	$q_{es}$ (pC)	$u_{q_{es}}(pC)$	$u_{fit}$ (pC)	valor-p
GP6 6336	27/08/2010	32,3729	0,0346	33,08 (0,17 %)	0,24%	32,4799	0,0452	-45,39	0,79	22,71 (0,12 %)	0,00%
GP6 6336	27/08/2010	32,9994	0,0644	61,55 (0,31 %)	0,43%	33,1720	0,0990	-73,26	1,73	49,69 (0,25 %)	0,00%
GP6 6336	04/08/2022	33,2733	0,1651	167,00 (0,84 %)	2,00%	33,9822	0,3114	-201,10	4,67	142,77 (0,72 %)	0,00%
GP6 6337	27/08/2010	33,5448	0,0861	82,22 (0,41 %)	0,61%	33,7875	0,1261	-103,01	2,21	63,30 (0,31 %)	0,00%
GP6 6931	26/06/2019	34,0483	0,0385	36,78 (0,18 %)	0,25%	34,1778	0,0424	-54,98	0,74	21,30 (0,10 %)	0,00%
GP6 6931	04/08/2022	34,4384	0,2266	229,78 (1,11 %)	3,90%	34,9247	0,4967	-138,27	7,47	228,21 (1,10 %)	0,00%
GP6 6933	26/06/2019	34,0960	0,0384	36,65 (0,18 %)	0,25%	34,2212	0,0454	-53,17	0,79	22,78 (0,11 %)	0,00%
GP6 6795	08/05/2018	33,8792	0,0573	54,71 (0,27 %)	0,41%	34,0744	0,0610	-82,84	1,07	30,61 (0,15 %)	0,00%
GP6 6795	04/08/2022	33,9878	0,1517	153,27 (0,75 %)	1,64%	34,0274	0,3471	-11,21	5,21	158,55 (0,78 %)	4,93%
GP2 2170	28/02/2013	54,2149	0,1173	36,52 (0,34 %)	0,58%	54,5588	0,1566	-45,38	1,50	26,88 (0,25 %)	0,00%
GP2 2170	26/08/2019	52,1848	0,2215	69,02 (0,66 %)	1,03%	51,4486	0,2431	97,16	2,33	41,72 (0,40 %)	0,00%
GP2 2170	04/08/2022	55,6123	0,1291	56,96 (0,51 %)	0,89%	55,4384	0,2353	23,03	2,26	57,37 (0,52 %)	0,00%
GP2 2171	04/10/2018	53,4006	0,0466	14,52 (0,14 %)	0,18%	53,2269	0,0336	22,93	0,32	5,77 (0,05 %)	0,00%
GP2 2270	08/05/2018	54,6234	0,1041	32,42 (0,30 %)	0,51%	54,9212	0,1429	-39,29	1,37	24,52 (0,22 %)	0,00%
GP2 2274	26/06/2019	53,6708	0,1579	49,18 (0,46 %)	0,71%	54,1783	0,1848	-66,96	1,77	31,72 (0,30 %)	0,00%
GP2 2272	08/05/2018	54,0947	0,1433	44,62 (0,41 %)	0,69%	54,5123	0,1928	-55,09	1,85	33,08 (0,31 %)	0,00%
GP2 2122	27/08/2010	51,4110	0,1135	35,35 (0,34 %)	0,58%	51,7516	0,1475	-44,93	1,41	25,31 (0,25 %)	0,00%

Tabela 22 – Resultado de avaliação do ajuste em certificados de calibração para transdutores HPI GP6 e GP2.

## Apêndice B – Esquemático da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente



Figura 67 – Esquemático da modelagem da cadeia de medição de pressão transiente.

### Anexo A – Artigo Publicado – Sensors 2023



Sensors 2023, 23, 8081

method is the most advantageous in several aspects [6]. Piezoelectric transducer measurements make it possible to obtain relevant information, such as the maximum pressure inside the chamber and the pressure profile over time, yielding helpful knowledge in the development of weapons and the analysis of the performance and safety of ammunition [7].

Measurements using piezoelectric transducers originate from the direct piezoelectric effect, an electrical charge on the order of picocoulombs (pCs), which must be converted to pressure by dividing it by the piezoelectric sensitivity coefficient, whose unit is pC/MPa. Because the charge generated is too small for direct measurement, to make pressure measurements possible using piezoelectric transducers, it is necessary to use charge amplifiers, which convert the electric charge originating from the direct piezoelectric effect into a voltage [8,9]. For example, in the case of the HPI B217 charge amplifier, the output voltage is from -10 V to +10 V, a voltage range with sufficient amplitude to be measured by any commercial oscilloscope.

Given this, the measurement of ammunition dynamic pressure in ballistics tests necessarily takes place by means of a measurement chain composed of a piezoelectric transducer and a charge amplifier. Therefore, modeling piezoelectric transducers and charge amplifiers as electrical circuits undoubtedly represents a valuable tool for simulations and theoretical studies of the dynamic pressure measurement chain, allowing a better understanding of how these devices work and how their electrical configuration affects dynamic pressure measurements in ammunition testing. As the signals obtained from dynamic pressure measurements are necessarily conditioned by charge amplifiers, the modeling of the two components of the measurement chain is relevant because it will ensure that the result of simulations provided by the model created is as reliable as possible for the real case. Additionally, no methodology with a similar objective, that is, modeling the measurement chain completely, was found in the literature.

Therefore, this study aimed to model the dynamic pressure measurement chain of interior ballistics. For this, two different methods were considered: (i) impedance analysis for the HPI GP6 piezoelectric transducer; and (ii) characterization for the HPI B217 charge amplifier, that is, the identification of the circuit parameters by means of the system response, given a known input. Furthermore, with the results, a simulation with ballistics data is implemented, aiming to demonstrate the applicability of the complete model.

This paper is divided as follows: Section 2 briefly discusses the theoretical foundation of the metrological core of the study. Section 3 presents the methods used for the modeling. Section 4 shows the results obtained, that is, the elements of each electrical circuit model of the piezoelectric transducer and the charge amplifier, as well as examples of the application of the model with the pressure curve of interior ballistics obtained by simulation and with pressure curves characteristic of the calibration of piezoelectric transducers using dead weight. Finally, Section 5 presents the conclusions and final considerations of the study.

#### 2. Interior Ballistics—Internal Pressure Measurement

Piezoelectric transducers play a crucial role in ensuring metrological reliability during weapons and ammunition testing, because the most critical parameter to measure is the internal pressure resulting from the expansion of the propellant's combustion gases [10]. These transducers allow for the measurement of the pressure profile developed by the ammunition, enabling the accurate evaluation of weapon and ammunition performance and safety. Therefore, piezoelectric transducers are essential devices for testing weapons and ammunition.

In ammunition tests in which the internal pressure is measured, one or two piezoelectric transducers can be installed, with the positions defined by each certifying organization. For EPVAT tests (Electronic Pressure Velocity and Action Time), the North Atlantic Treaty Organization (NATO) determines that a transducer is installed in the test barrel in a position equivalent to the mouth of the ammunition case for tests of all calibers, aiming to measure the "case mouth pressure", and in the case of calibers of  $5.56 \times 45$  mm and  $7.62 \times 51$  mm, a



to use charge amplifiers in the instrumentation to convert the electric charge originating from the direct piezoelectric effect into a proportional electric voltage. Thus, from the dynamic pressure pulse, the piezoelectric transducer produces an electric charge that, in turn, is converted into a voltage by the charge amplifier. Finally, the voltage measurement can be performed using an oscilloscope, for example, so that it is converted into pressure, knowing the charge amplifier amplification factor and the sensitivity of the piezoelectric transducer, completing the pressure measurement chain, summarized in Figure 3.



The modeling of the entire measuring chain in equivalent electronic circuits, that is, the modeling of piezoelectric transducers and charge amplifiers, provides a better understanding of the electrical characteristics of piezoelectric transducers. Therefore, it is essential for the design of measurement systems based on piezoelectric sensors [18].

#### 3. Modeling of the Interior Ballistics Pressure Measurement Chain

To obtain the electrical model of the entire measurement chain, the methods used in modeling the piezoelectric transducer, by impedance analysis, and then for the charge amplifier, using the characterization method, will be presented.

#### 3.1. Piezoelectric Transducer Modeling Subsection

For the modeling of the HPI GP6 piezoelectric transducer, the model called Butterworth-Van Dyke (BVD) was considered, as recommended by the IEEE Standard on Piezoelectricity (ANSI/IEEE Std 176-1987) [19]. The BVD model is useful for the analysis of the electrical performance of piezoelectric transducers [20] and can be used in the design and optimization of piezoelectric devices [21–24]. The BVD model circuit consists of a resistor, an inductor and a capacitor in series ( $R_m$ ,  $L_m$ ,  $C_m$ ), all connected in parallel with a second capacitor ( $C_0$ ), as shown in Figure 5.



Figure 5. Butterworth–Van Dyke electric model.

The capacitance  $C_0$ , which dominates the transducer impedance outside the resonance region, models the piezoelectric elements' dielectric capacitance and the parasitic capacitance of the cables, whereas the parameters  $R_m$ ,  $L_m$  and  $C_m$  model the mechanical oscillation of the transducer [25].

For piezoelectric transducers used in ballistics tests, the magnitude to be measured is the dynamic pressure developed inside the barrel of a weapon. Therefore, pressure must be the input data of the circuit. In turn, the electrical charge (*q*) is defined by the piezoelectric sensitivity (*d*) of the transducer, which defines the relationship between the electrical charge and the pressure. Thus, in the electrical model, the input data will be represented by a current source (*I*), which will be determined by the derivative of the electrical charge with respect to time (dQ/dt), or by the derivative of the pressure in time (dP/dt), multiplied by the piezoelectric sensitivity (*d*):

$$I = \frac{dQ}{dt} = d \cdot \frac{dP}{dt} \tag{1}$$

To determine the BVD model's parameters, the following technique will be used: the impedance of the BVD model ( $Z_{BVD}$ ) will be fitted to the characteristic impedance

Sensors 2023, 23, 8081

of the piezoelectric transducer, measured experimentally. For the BVD model, the  $Z_{BVD}$  impedance is calculated by:

$$Z_{BVD} = \frac{\left(\frac{1}{i\omega C_0}\right) \left(j\omega L_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)}{\frac{1}{i\omega C_0} + j\omega L_m + R_m + \frac{1}{i\omega C_m}}$$
(2)

From the impedance equation of the BVD model (2), its elements can be determined employing the least squares curve fitting of the impedance obtained experimentally, unlike other approaches, in which the determination of the elements of the electric circuit takes place by means of parametric equations dependent on the magnitude of the impedance at specific frequencies [22,24,25], or even by employing physical parameters that are characteristic of the piezoelectric material of the transducer [26]. For this, we used a Keysight E4900A impedance analyzer, which basically excites the transducer through a voltage of 100 mV with a variable frequency and measures its response, providing the reactance and resistance for a frequency range from 1 kHz to 100 kHz. Calculated by Fast Fourier Transform (FFT), the frequency domain representation of the pressure-time signal of Figure 4 is shown in Figure 6, showing that the useful signal is lower than 20 kHz. So, it is acceptable to use the referred frequency range (1–100 kHz) for the impedance fit.



Figure 6. Fast Fourier Transform of the pressure-time signal shown in Figure 4.

For impedance measurements by an impedance analyzer, some connection circuits can be used, depending on many factors, such as the frequency range to be examined. In this case, the circuit detailed in Figure 7, called the Auto-Balancing Bridge Method, was used.



Figure 7. Impedance measurement circuit: Auto-Balancing Bridge Method [27].

Sensors 2023, 23, 8081

In the measuring circuit, the current  $I_x$  passes through the device under test (DUT). In turn, the current  $I_r$ , which passes through resistor  $R_r$ , is converted into voltage  $V_x$ , measured by terminal 4.

$$\frac{V_x}{Z_x} = I_x = I_r = \frac{V_r}{R_r}$$
(3)

Since the current  $I_r$  is equal to  $I_x$ , the impedance  $Z_x$  is determined by the  $V_x$  and  $V_r$  voltages, measured by terminals 2 and 4, respectively [27], that is:

$$Z_x = R_r \cdot \frac{V_x}{V_r} \tag{4}$$

Based on the results of the impedance analysis, the function "Isqcurvefit", available in MATLAB (version 9.13.0.2105380), was used to determine the parameters of the BVD model for the piezoelectric transducer HPI GP6. The function receives as input parameters the nonlinear function determined by (2), as well as the experimental data to which it must be fitted, in addition to the initial values and the upper and lower limits for the variables to be estimated.

#### 3.2. Charge Amplifier Modeling

Advancing in the modeling of the dynamic pressure measurement chain, in the case of the charge amplifier, the simplified topology presented in Figure 8 [28–31] was adopted to compose the modeling as a whole.



Figure 8. Charge amplifier electrical model.

In this circuit model, the transfer function is derived by:

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = -\frac{1/R_{in}C_f}{s+1/C_fR_f}$$
(5)

Applying the inverse Laplace transform to the transfer function, the following relationship between the output voltage and the input voltage is obtained:

$$\frac{e_o(t)}{e_i(t)} = -\frac{1}{R_{in}C_f} \cdot e^{-\frac{1}{R_fC_f}t}$$
(6)

Upon the input of a step signal, the initial output voltage will be  $-1/R_{in}C_{f}$ , returning to zero according to the exponential function with the time constant  $\tau = C_f R_f$ . The limit for the duration of charge measurements can be defined in the interval  $0 < t < 0.02\tau$ , for an error limit of 2%, for example [12].

Intending to characterize the HPI B217 charge amplifier, including allowing the determination of the time constant, the following procedure was adopted: from a previously defined input voltage, the amplifier response was observed using the digital oscilloscope



Plugged into the output of the function generator, a reference capacitor with capacitance  $C_{ref}$  was inserted, allowing the voltage  $e_i(t)$  to be converted into the electric charge q(t), according to:

$$q(t) = C_{ref} \cdot e_i(t) \tag{7}$$

Subsequently, the amplifier was connected in series to the circuit, and its response was observed with the same oscilloscope mentioned above. For the characterization, four different reference capacitors were used, with the respective capacitances described in Table 1.

Table 1. Reference Capacitors Values.

$C_{ref1}$	$C_{ref2}$	$C_{ref3}$	$C_{ref4}$
2218.8 pF	2199.2 pF	1509.7 pF	1000.1 pF

Figure 10 shows the instruments connected in series for the characterization of the HPI B217 charge amplifier.



Figure 10. Instruments series connection: (a) function generator HPI B202; (b) reference capacitor; (c) charge amplifier HPI B217; and (d) oscilloscope.



Similar to the characterization of the charge amplifier, using MATLAB's "Isqnonlin" function, the parameters were fitted to the data simulated by the electrical model implemented in LTspice, that is, the parameters of the complete model of the measurement chain were inserted in LTspice, and the simulation results were compared with the experimental data, identical to the model input data, thus determining the error. In this case, the initial



### 11 of 20

#### 3.4. Simulations Applied to Pressure Measurement in Calibration

To demonstrate the applicability of the complete model, two sequential simulations were performed. The first uses data obtained with the interior ballistics module of PRODAS software (Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System), which simulates the pressure gradient inside the barrel based on empirical functions [32]. Basically, PRODAS provides the temporal evolution of displacement, pressure and velocity for a projectile inside the barrel, based on characteristics of the primer and propellant, projectile and weapon, that is, dimensions of the chamber, rifling and barrel length, in addition to maximum pressure data inside the barrel and the final velocity of the projectile (muzzle velocity) [33].

Then, a second simulation was performed using data from a hypothetical calibration. The calibration of piezoelectric transducers similar to HPI GP6, according to the standards for the evaluation of ammunition [11,34], can be performed using a dead weight, a system intended for the direct calibration of static pressure measuring instruments. Since piezoelectric transducers are not able to measure static pressures, a valve system with rapid pressure relief is coupled to the dead weight, inserting into the calibration process a dynamic event that can be characterized as a negative step [16]. Therefore, in the case of the calibration simulation, the negative step was modeled according to the sigmoid function [32], whose expression is determined by:

$$q(t) = d \cdot P_{max} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-2kt}}\right) \tag{8}$$

where *d* is the piezoelectric sensitivity;  $P_{max}$  is the maximum pressure obtained in the calibration, determined by the dead weight; and *k* is the coefficient that will determine the duration of the dynamic event.

For the calibration of piezoelectric transducers, the duration of the dynamic event is directly linked to the characteristics of the charge amplifier, as already mentioned in Section 3.2. Thus, there is relevance in simulating step inputs with varying fall times (defined between the levels of 90% and 10% of the maximum charge) in order to determine the limit for the correct measurement of the pressure/electric charge, without attenuation of the response caused by the measurement chain. Thus, by varying the constant k, it is possible to create different dynamic events with their respective fall times, as shown in Table 2.

Table 2. Dynamic events fall times for each value of *k*.

k = 80	k = 150	k = 400	k = 800	k = 1600	k = 2400	k = 3200
27.465 ms	14.648 ms	5.493 ms	2.746 ms	1.373 ms	0.915 ms	0.687 ms

In both simulations, the current (*I*), input to the electrical model of the pressure measurement chain, was calculated by the discrete derivative of pressure (*P*) with respect to time, which in turn was calculated by the piezoelectric sensitivity (*d*) of 33 pC/MPa, according to Equation (1).

#### 4. Results

4.1. HPI GP6 Piezoelectric Transducer Electric Model

After measuring the impedance of the HPI GP6 piezoelectric transducer with the impedance analyzer, and considering the BVD model impedance equation presented in Figure 5, by using the methodology detailed in Section 3.1, the curve fitting in MATLAB using the "lsqcurvefit" function could be obtained as shown in Figure 14, with the optimized parameters shown in Table 3.







Figure 17. Error calculated between experimental data and simulated data obtained with refined parameters.

Thus, with the modeling of the HPI GP6 piezoelectric transducer and the HPI B217 charge amplifier, after the parameters refinement with experimental data, it is possible to compose the entire pressure measurement chain and present the complete circuit, as shown in Figure 18.



Figure 18. Dynamic pressure measuring chain electrical model composed by piezoelectric transducer and charge amplifier.

The values of each parameter obtained in the two least squares curve-fit procedures, followed by the refinement of the entire parameter set, are shown in Table 5. Regarding the modeling of the measurement chain, it is important to highlight that

Regarding the modeling of the measurement chain, it is important to highlight that it was based on the impedance analysis and the response of the charge amplifier, aiming at electrical modeling of the electromechanical components (namely, the piezoelectric transducer and charge amplifier), and not of the physics behind the generation of the pressure curve originating with the interior ballistics. Therefore, aspects relating to interior ballistics, such as design values of weapons and ammunition and the energy characteristics of the gun propellant, are not considered. In other words, the generation of the pressure curve P(t) was not the objective of the modeling, but the curve itself was used as input to improve the electrical model of the measurement chain. Sensors 2023, 23, 8081

Table 5. Parameters of the electrical model of the dynamic pressure measurement chain.

Parameter	Value	
$C_0$	0.20704 nF	
$R_m$	80.78297 MΩ	
$L_m$	0.13356 μH	
$C_m$	0.55958 pF	
Rf	1.06508 ĜΩ	
Ćŕ	0.59947 nF	
$R_{in}^{j}$	0.72604 kΩ	
$L_m$ $L_m$ $C_m$ $R_f$ $C_f$ $R_{in}$	0.7357 Mi 0.13356 μH 0.55958 pF 1.06508 GΩ 0.55947 nF 0.72604 kΩ	

4.4. Simulation of Interior Ballistics Pressure Measurement

After determining the measurement chain equivalent circuit, that is, the modeling of the HPI GP6 piezoelectric transducer and the HPI B217 charge amplifier, in order to demonstrate the applicability of the complete model, simulations were performed with interior ballistics data in LTspice, according to the methodology described in Section 3.

In order to generate input data for the first simulation, that is, the pressure-time curve, the PRODAS interior ballistics module was used. In this example, the parameters of the 7.62 × 51 mm NATO Ball ammunition were adopted, with data from a 7.62 × 51 mm EPVAT test barrel. Figure 19 shows the theoretical breech pressure curve over time for the 7.62 × 51 mm NATO Ball caliber simulation, as well as the calculated electrical charge for a transducer with a nominal sensitivity of 33 pC/MPa.



Figure 19. Theoretical breech pressure-time curve for 7.62  $\times$  51 mm NATO Ball ammunition in EPVAT test barrel.

As the current is the derivative of the electric charge with respect to time, it is possible to determine it from the charge-time curve. This, therefore, will be the input of the pressure measurement chain electric model, to be simulated by LTspice.

From the assembly of the electrical circuit in LTspice and the data from simulation of interior ballistics obtained with PRODAS, it was possible to obtain the results shown in Figure 20.

The calculated error can be better seen in Figure 21. The error corresponding to the maximum pressure point is 7.6140 pC (0.0653%).



Figure 20. Charge-time curve of PRODAS simulation and LTspice circuit model simulation, and calculated error between them.



Figure 21. Calculated error between charge-time curve of PRODAS simulation and LTspice circuit model simulation.

For the simulation of the calibration by means of dead weight together with the pressure relief system, seven characteristic curves of the negative step of the pressure/electric charge were used, based on the expression (8), by varying the constant k according to Table 2.

For a calibration pressure ( $P_{max}$ ) of 400 MPa, assuming the piezoelectric sensitivity (d) of 33 pC/MPa, the different inputs can be determined according to Figure 22. Each input signal is a negative step with an initial electric charge of 13,200 pC, corresponding to 400



Analyzing the responses, it is noticed that the slower the dynamic event, that is, the opening of the valve system represented by the negative step inserted in the model, the greater the attenuation of the input signal by the measurement chain. In all cases, after reaching the respective minimum values, the electric charge curves follow the characteristic discharge curve of the modeled charge amplifier. Table 6 details, for each electric charge curve originated with the simulation, the difference between the desired load,
i.e., -13,200 pC, and the minimum load obtained, in addition to the equivalent pressure, considering the piezoelectric sensitivity of 33 pC/MPa.

Table 6. Error for each signal with respective fall time (duration of dynamic event).

k	Fall Time	Error
k = 80	27.465 ms	700.6 pC/21.23 MPa (5.31%)
k = 150	14.648 ms	414.2 pC/12.55 MPa (3.14%)
k = 400	5.493 ms	174.5 pC/5.29 MPa (1.32%)
k = 800	2.746 ms	90.7 pC/2.75 MPa (0.69%)
k = 1600	1.373 ms	44.1 pC/1.34 MPa (0.33%)
k = 2400	0.915 ms	27.3 pC/0.83 MPa (0.21%)
k = 3200	0.687 ms	18.5 pC/0.56 MPa (0.14%)

#### 5. Conclusions

Fundamentally, this work starts from the assumption that a better understanding of the electrical characteristics of piezoelectric transducers can be obtained from the modeling of the entire measuring chain in equivalent electronic circuits. Thus, the interior ballistics pressure measurement chain of ammunition was modeled by an electronic circuit.

For this purpose, the HPI GP6 piezoelectric transducer and the HPI B217 charge amplifier, both used to measure dynamic pressure in ballistics tests of ammunition, were modeled. As an initial step for the HPI GP6 modeling, the BVD model for the piezoelectric transducer was determined from its characteristic impedance, obtained with an impedance analyzer, and the curve fit for the equivalent circuit was solved using MATLAB.

With regard to the charge amplifier, the characterization occurred based on the observation of its response to input variation, with the curve fit performed again with the help of MATLAB, this time in conjunction with LTspice software. Finally, the parameters were refined using the experimental pressure-time curve.

In addition, from the determination of the measurement chain circuit, that is, the transducer in series with the charge amplifier, two simulations were performed. First, the data obtained with the PRODAS interior ballistics module were used, resulting in an error at the maximum pressure point of 7.6140 pC (0.0653%).

In view of the results obtained, both in the refinement of the parameters through the experimental data and in the simulation with the data from PRODAS, the dynamic pressure measurement chain modeling was considered effective since the operations of multiplication by piezoelectric sensitivity and the derivation to obtain the current, followed by the simulation of the piezoelectric transducer and the charge amplifier electric models and, finally, the conversion of the output voltage in electric charge/pressure, return to the original curve without significant distortions.

Next, the calibration of the piezoelectric transducer was simulated using a dead weight with pressure variations with different fall times, represented by negative steps, as presented in Figure 22. In this case, the simulations demonstrated the attenuation of the input signals by the modeled measurement chain, indicating that the slower the dynamic event of pressure variation, the greater the difference between the input pressure and the measurement chain response.

In short, it was concluded that the calibration simulation of the piezoelectric transducer demonstrates the applicability of the generated model, and the information related to the attenuation of the signal by the measurement chain is relevant for studies aimed at the construction of calibration systems.

Regarding the applicability of the model to other piezoelectric transducers used in ballistics tests, it is believed that the methodology is applicable, given the similarity of the measurement chain. However, this statement requires scientific confirmation, which will provide comparability between the electrical models of different piezoelectric transducers.

Finally, it was also observed that the effectiveness of the modeling can be verified together with other applications aimed at testing propellants and ammunition, such as the

18 of 20

	piezoelectric transducer calibration method, called 'dropweight', and closed vessel tests this sense, this observation is an interesting suggestion for future work.
	Author Contributions: Methodology, C.B.C.F. and C.R.H.B.; Investigation, C.B.C.F., K.A.R.M. C.R.H.B.; Writing—original draft preparation, C.B.C.F.; Writing—review and editing, C.B. K.A.R.M. and C.R.H.B.; Supervision, K.A.R.M. and C.R.H.B. All authors have read and ag to the published version of the manuscript.
	<b>Funding:</b> The authors are thankful for the financial support provided by the Brazilian func agencies CNPq, CAPES, FINEP and FAPERJ. This study was financed in part by the Coordenaçã Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Finance Code 001.
	<b>Data Availability Statement:</b> The data presented in this study are available upon request from corresponding author. The data are not publicly available due to this study being part of a mast degree research which is still in the completion phase.
	Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.
Ref	erences
1.	Curie, J.; Curie, P. Développement Par Compression de l'électricité Polaire Dans Les Cristaux Hémièdres à Faces Inclinées.
2.	Thomson, J.J. Piezo-Electricity and Its Applications. <i>Engineering</i> <b>1919</b> , 107, 543–544.
3.	Arnau, A. Piezoelectric Transducers and Applications; Arnau Vives, A., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2
4.	Elkarous, L.; Nasri, A.; Nasri, R. Numerical Modeling and Analysis of the Pressure Pulses Generator for the Dynamic Calibra
_	of High-Pressure Transducers. Appl. Acoust. 2019, 147, 56–63. [CrossRef]
5.	Lavayssiere, M.; Letrançois, A.; Crabos, B.; Genetier, M.; Daudy, M.; Comte, S.; Dutourmentel, A.; Salsac, B.; Sol, F.; Verdier, F.; Toward Improvements in Pressure Measurements for Near Free-Field Blast Experiments. <i>Sensors</i> <b>2023</b> , <i>23</i> , 5635. [Cross [PubMed]
6.	Vlhova, J.; Vitek, R. The Analysis of 7.62 Mm × 39 Ammunition Ballistic Pressure Measurement Results by a Pressure Gauge a Piezoelectric Transducer. In Proceedings of the 2021 International Conference on Military Technologies (ICMT), Brno, C Republic, 8 June 2021, pp. 1–6.
7.	Carlucci, D.E.; Jacobson, S.S. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2 JSN 978-1-138-05531-5.
8.	Webster, J.G. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook; Chapman & Hall/CRCnetBASE: Boca Raton, FL, USA, ISBN 978-0-8493-2145-0.
9.	Pallas, A. Sensores and Signal Conditioning; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2012.
10.	Elkarous, L.; Pirlot, M.; Golinval, J.; Maldague, M.P. Investigation on Gas Pressure Measurement inside Small Ca Weapons with Piezoelectric Transducers. In Proceedings of the Measurement Science Conference 2012, Anaheim, CA, U 25–28 March 2011.
11.	North Atlantic Treaty Organization. NSO AEP-97: Multi-Calibre Manual of Proof and Inspection (M-CMOPI) for NATO Small A Ammunition; North Atlantic Treaty Organization: Brussel, Belgium, 2020.
12. 13.	Gautschi, G. <i>Piezoelectric Sensorics</i> ; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002; ISBN 978-3-642-07600-8. Krempl, P.W. Quartz Homeotypic Gallium-Orthophosphate—A New High Tech Piezoelectric Material. In Proceedings o IEEE Ultrasonics Symposium ULTSYM-94, Cannes, France, 31 October–3 November 1994; Volume 2, pp. 949–954.
14.	Wilson, J.S. (Ed.) Sensor Technology Handbook; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; Boston, MA, USA, 2005; ISBN 978-0-7506-77
15. 16.	AVL Gmon 55000-A01 Charge Amplifier Operational Instruction; AVL: Graz, Styria, Austria, 1989. Hjelmgren, J. Dynamic Measurement of Pressure. A Literature Survey; Sveriges provnings- och forskningsinstitut (SP): Borås, Swe 2002: ISBN 978-91-7848-925-1
17.	Slanina, O.; Quabis, S.; Wynands, R. Reproducibility of C. I. PCompatible Dynamic Pressure Measurements. <i>tm-Technis</i> Messen 2020, 87, 630–636. [CrossRef]
18.	Guan, M.; Liao, WH. Studies on the Circuit Models of Piezoelectric Ceramics. In Proceedings of the International Conference Information Acquisition, Hefei, China, 21–25 June 2004; pp. 26–31.
19. 20	ANSI/IEEE Std 176-1987; IEEE Standard on Piezoelectricity. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 1988. [CrossRef]
20.	Audio Directional Loudspeaker. In Proceedings of the 2008 International Conference on Computer and Electrical Enginee Phuket, Thailand, 20–22 December 2008; pp. 812–816.
21.	Alkhfaji, S.S.; Garvey, S.D. Identification of Piezo-Electric Actuator Parameters Using a Simple Test Technique. In Proceeding

Sensors 2023, 23, 8081

- 22. Zhong, X.; Lam, S. Perpetual-Operation Frequency Response and Equivalent Circuit Modelling of Piezoelectric Ultrasonic Atomizer Devices. In Proceedings of the 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Taipei, Taiwan, 21-24 October 2015: pp. 1-4.
- Jang, J.; Choi, J.; Lee, D.; Mok, H. Estimation Method of an Electrical Equivalent Circuit for Sonar Transducer Impedance 23. Characteristic of Multiple Resonance. Sensors 2023, 23, 6636. [CrossRef] [PubMed]
- Feng, Y.; Zhao, Y.; Yan, H.; Cai, H. A Driving Power Supply for Piezoelectric Transducers Based on an Improved LC Matching Network. *Sensors* 2023, 23, 5745. [CrossRef] [PubMed] 24.
- Stutzer, D.; Hofmann, M.; Wenger, D.; Harmouch, K.; Lenoir, D.; Burger, J.; Niederhauser, T. Characterization and Modeling of a 25. Planar Ultrasonic Piezoelectric Transducer for Periodontal Scalers. Sens. Actuators A Phys. 2023, 351, 114131. [CrossRef]
- Casteleiro-Roca, J.L.; Calvo-Rolle, J.L.; Meizoso-Lopez, M.C.; Piñón-Pazos, A.; Rodríguez-Gómez, B.A. New Approach for the QCM Sensors Characterization. Sens. Actuators A Phys. 2014, 207, 1–9. [CrossRef] 26.
- Keysight Technologies. Impedance Measurement Handbook: A Guide to Measurement Technology and Techniques, 6th ed. 2016. Available 27. online: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06840/application-notes/5950-3000.pdf (accessed on 21 September 2023). Jung, W.G. (Ed.) *Op Amp Applications*; Analog Devices, Inc.: Norwood, MA, USA, 2002; ISBN 978-0-916550-26-4. 28.
- Oven, R. Modified Charge Amplifier for Stray Immune Capacitance Measurements. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2014, 63, 1748–1752. 29. [CrossRef]
- 30 Laurila, M.-M.; Tokito, S.; Mantysalo, M.; Matsui, H.; Shiwaku, R.; Peltokangas, M.; Verho, J.; Montero, K.L.; Sekine, T.; Vehkaoja, A.; et al. A Fully Printed Ultra-Thin Charge Amplifier for on-Skin Biosignal Measurements. IEEE J. Electron Devices Soc. 2019, 7, 566–574. [CrossRef]
- Alnasser, E. A Novel Low Output Offset Voltage Charge Amplifier for Piezoelectric Sensors. IEEE Sens. J. 2020, 20, 5360–5367. 31. [CrossRef]
- 32. Cronemberger, P.O.; Lima, E.P., Jr.; Gois, J.A.M.; Caldeira, A.B. Theoretical and Experimental Study of the Interior Ballistics of a Rifle 7.62. RETERM 2014, 13, 20. [CrossRef]
- Arrow Tech Associates, Inc PRODAS V3 User Manual; Arrow Tech Associates: South Burlington, VT, USA, 2015. Available online: 33. https://arrowtechassociates.com (accessed on 21 September 2023). Comprehensive Edition of Adopted, C.I.P. *Decisions;* Comission Internationale Permanente: Liege, Belgium, 2001.
- 34.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

20 of 20

# Anexo B – Artigo Publicado – CIMMEC – Metrologia 2023



In general, the demand for measurements with low uncertainty is hindered by the lack of traceability in the calibration methods of dynamic (non-acoustic) pressure transducers [1,5,6]. Traceable calibration, a requirement for quality assurance in laboratories accredited by ISO 17025:2017 [7], generates the need to adapt the calibration methods available for static pressure measuring instruments [5], for example, those that have a traceable standard. Another limiting factor is the lack of normalization of the dynamic pressure calibration procedures, including the determination of the measurement uncertainty [5,8].

Concerning the conformity assessment of small caliber ammunitions, the technical standards dedicated to the standardization of procedures and minimum performance conditions were published by three organizations: (i) the North Atlantic Treaty Organization (NATO), by means of the AEP-97 – Multi-caliber manual of proof and inspection (M-CMOPI) for NATO small arms and ammunition [9]; (ii) the Permanent International Commission (CIP) for the Proof of Small Arms [10]; and (iii) the Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute (SAAMI) [11]. These organizations standardize the calibration methods for piezoelectric transducers in addition to the acceptance criteria.

In Brazil, there is no accredited calibration laboratory that is capable of meeting the needs of ballistics testing laboratories regarding the traceability of piezoelectric pressure transducers. Therefore, the acquisition of equipment dedicated to the calibration of piezoelectric transducers, according to the mentioned standardizing organizations, becomes a facilitator for testing laboratories, since the calibration procedures can be carried out in the same laboratory where the tests take place, reducing the time and cost of calibration. However, the laboratory must meet the quality requirements of ISO/IEC 17025:2017 concerning the execution of calibration, that is, to prove traceability, including determining the measurement uncertainty of the calibration.

This work presents evaluation of two distinct calibration methods, currently adopted by nonaccredited testing laboratories. Regarding the organization of the work, in section 2, fundamental concepts for the measurement of dynamic pressure with piezoelectric transducers and indirect calibration of piezoelectric transducers are presented, highlighting relevant aspects related to ISO/IEC 17025:2017. In section 3, the evaluated indirect calibration methods are presented, detailing the particularities of each method, as well as the specificities of the equipment used. Calibration results using the evaluated methodologies are presented in section 4, and discussed in the subsequent section.

#### 2. Background

In this section, the main concepts of the dynamic pressure measurement chain using piezoelectric transducers are covered, as well as the methods of indirect calibration of piezoelectric transducers.

#### 2.1. Dynamic pressure measurement with piezoelectric transducer

The sensing element of a piezoelectric transducer is a piezoelectric crystal, which generates an electric charge proportional to the tensile or compressive stress [12]. In the case of piezoelectric pressure transducers, the direct piezoelectric effect enables the measurement of dynamic pressure by means of the generated electric charge, usually measured in picocoulombs (pC), as an effect produced by compression.

Considering that piezoelectric crystals exhibit a rapid response to pressure variations, such materials are applicable to dynamic pressure measurements. However, such piezoelectric transducers exhibit capacitive behavior, rapidly discharging the generated electric charge, exponentially following a parameter called the discharge time constant [13]. This prevents piezoelectric transducers from being used for static pressure measurements, as well as hinders the processes of measuring dynamic pressures and calibrating transducers.

Thus, the measurement of the electric charge originating from the dynamic pressure produced by the burning of the ammunition propellant is made possible with the use of charge amplifiers, whose elementary function is to convert the electric charge originating from the piezoelectric effect into an electric voltage proportional to it, thus reducing the discharge effect previously mentioned. A charge amplifier is based on operational amplifiers with integrator circuit topology, generating an electrical voltage that can then be measured using oscilloscopes or analog/digital converters. Thus, the dynamic pressure can be determined by knowing the piezoelectric sensitivity (pC/MPa), which must be determined by a calibration method, and the gain of the charge amplifier (mV/pC). The measurement chain is shown in Fig. 1.





Although it is indicated only for dynamic pressure measurements, depending on the configuration of the charge amplifier, it is possible to perform pressure measurements with slow variations [15] called quasi-static measurements [16,17]. A charge amplifier typically presents the topology shown in Fig. 2.



Fig. 2: Charge amplifier electric model [18-21].

The output voltage  $e_0(t)$  for a unit step input is given by:

$$e_o(t) = \frac{R_f}{R_{in}} \left( e^{-\frac{t}{R_f C_f}} - 1 \right) = \frac{R_f}{R_{in}} \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right)$$
(1)

The time constant  $\tau = R_f C_f$  determines the charge and discharge rates of the charge amplifier [22], that is, the initial output voltage will be zero, reaching  $-R_f/R_{in}$  according to the exponential function with time constant  $\tau$ . The limit for the duration of charge measurements can be set in the interval  $0 < t < 0.02\tau$ , for an error limit of 2 %, for example [22].

Because charge amplifiers are components of the dynamic pressure measurement chain, this equipment should be used both in the ammunition testing and in the calibration of piezoelectric transducers. Calibration, in turn, involves of the determination of piezoelectric sensitivity by measuring the electric charge produced by applying a known pressure [9] originating from a traceable standard (direct calibration) or measured by a reference transducer (indirect calibration). As previously mentioned, the application of static pressure does not produce the desired effect on piezoelectric transducers. Thus, a dynamic event is inserted in the calibration process with a certain duration, influencing the time constant  $\tau$  determined by the charge amplifier. Generally, for the calibration of piezoelectric transducers used in ballistics tests, from the obtaining of the desired pressure, a relief valve is opened quickly, characterizing a negative step with a certain duration of time [1,9,10].

In order to reduce measurement errors, CIP and NATO, for example, recommend that charge amplifiers used in calibration be configured to perform quasi-static measurements [9,10], that is, the time constant be set to "long". Such a configuration, in practice, generates the phenomenon called drift, which would be an electric charge originating in the measurement chain that has no relation to the measuring [22]. The drift has linear behavior and is independent of the force applied to the transducer, and should be taken into account in the calculation of the measurement uncertainty [23].

# 2.2. Indirect calibration of piezoelectric transducers

The conformity assessment of small caliber ammunition is carried out based on standards published by NATO, CIP and SAAMI. In standard pressure tests, pressure can be measured by means of piezoelectric transducers, and the HPI GP6 transducer, for example, is certified to perform pressure measurement according to CIP and NATO. The said transducer has a sensing element of gallium phosphate and is

capable of measuring pressures between 0 and 600 MPa. Fig. 3 shows the HPI GP6 transducer and an example in which two units are used to measure dynamic pressure in the barrel of a rifle.



Fig. 3: HPI GP6 piezoelectric transducer: instrumentation of a rifle using two units for chamber and muzzle pressure measurement.

There are two ways to perform dynamic pressure measurements in the indirect calibration, allowed by the tree organizations. The first is the pressurization of the cylinder by means of a piston and the measurement of electric charge at the moment of pressure relief performed by opening a valve, characterizing a negative step [1]. For this measurement, attention should be paid in configuring or selecting the charge amplifier with a time constant  $\tau$  appropriate to the duration of the dynamic event. In this work, this method will be called Indirect Dynamic Calibration (IDC).

The second method consists of measuring the charge continuously during the pressurization of the cylinder, and the charge amplifier must be configured or selected with long time constant  $\tau$ , which in the case of the PCB 443B102 charge amplifier, for example, would be equivalent to  $\tau$  greater than 10<sup>5</sup> s [24]. This method may be called Indirect Quasi-static Calibration (IQsC). Fig. 4 illustrates the pressure variation and calibration points that characterize the two processes.



Fig. 4: Pressure time diagrams for IDC and IQsC: (a) electric charge is measured at each predefined pressure level; (b) negative step is applied by fast pressure release.

In the calibration processes, from the electric charge  $q_k$  measurements corresponding to the *n* different predefined pressure levels  $P_k$ , the piezoelectric sensitivity *d* is defined by the angular coefficient of the line with null intercept, determined by means of least squares curve fitting [9,10]:

$$d = \frac{\sum_{k=1}^{n} P_k \cdot q_k}{\sum_{k=1}^{n} P_k^2}$$
(2)

The curve fitting is a key part of classifying the piezoelectric transducer for service life. For NATO, the transducer's sensitivity should not vary more than  $\pm 2\%$  from the sensitivity determined in the previous calibration and  $\pm 10\%$  from the original calibration [9]. In addition, the linearity error, i.e., the maximum vertical distance between the measured charge and the curve fitting, relative to the maximum charge corresponding to the full scale  $q_{FS}$ , shall not exceed  $\pm 1\%$  [9,10]. The linearity error can be determined using the following expression:

$$L = \frac{(q_k - d \cdot P_k)_{max}}{q_{Fs}} \%$$
(3)

The indirect calibration of the transducers adopted by the three organizations is commonly performed by testing laboratories, thus reducing time and cost in this essential step for performing ballistics tests. Laboratories must comply not only with the requirements related to the normative bases but also about quality assurance, in the case of laboratories accredited according to ISO/IEC 17025:2017. In this way, for example, the accredited testing laboratory that wishes to calibrate piezoelectric transducers must meet the requirements related to the calibration activity.

As a matter of priority, the laboratory must ensure the traceability of the measurements performed in the calibration procedures, that is, it must have sufficient information regarding the calibration of all instruments related to the dynamic pressure measurement chain used in the process: reference transducer, charge amplifier, oscilloscope/A/D converter. Despite the lack of a dynamic pressure reference standard [1], the accredited laboratory must be able to establish the traceability of measurements to the International System of Units (SI) [7].

In addition to the calibration of the instruments employed, the laboratory must be able to determine the measurement uncertainties, both in the calibration procedures and in the measurements during the tests. The calculation of the measurement uncertainty should consider mainly the influence of the charge amplifier, especially in the calibration processes, in which the drift will have great relevance if the time constant  $\tau$  is configured as long (quasi-static charge measurements) [23].

Commonly, the calibration of piezoelectric transducers used in ballistics tests can be carried out with the use of commercial equipment designed for such activity, such as the B630 Calibration Unit (HPI B630), manufactured by HPI GmbH, which employs the IQsC method, and the Model K9905D High Pressure Calibration System (TMS K9905D), developed by The Modal Shop, Inc., which uses the IDC method. The HPI B630 is equipped with a two-channel AVL B692 A01 charge amplifier, a hydraulic cylinder pressurized by means of a piston automated by a step motor and a reference piezoelectric transducer, and the calibration process is fully controlled by the HPI B3000 Ballistic Workframe software (version 2.44) [25].

In the TMS K9905D, the IDC is performed by manually pressurizing a hydraulic cylinder by means of the main four-wheel handles, with the reference calibration pressure determined by a Viatran 345EGSPW pressure transmitter and the dynamic event inserted into the process by manually opening a dump valve. The charge is measured by the single-channel PCB 443B102 charge amplifier [26].

Both systems are commercialized for calibration of piezoelectric transducers, meeting the regulatory bases related to small caliber ammunition. The possession of such equipment, together with the establishment of a calibration plan for the instruments included in the measurement chain, should not be a sufficient condition for quality assurance in the calibration processes. In addition, the laboratory needs to ensure that the technical staff has the competence to perform such activities, that is, has the capacity to perform the calibration activity with the necessary training and supervision for the correct execution according to the established methods [7,27].

# 3. Evaluation of indirect calibration methods

This section aims to present two calibrations of HPI GP6 transducers performed in different laboratories with IQsC and IDC methods. However, although these laboratories perform pressure tests for ammunition certification, it should be noted that they do not have the accreditation granted in Brazil by INMETRO/CGcre.

#### 3.1. Indirect Quasi-static Calibration (IQsC)

The HPI B630 equipment employs the IQsC method to perform the calibration of HPI GP6 transducers, using an HPI GP8 reference transducer, the latter with gallium phosphate sensing element and pressure measurement capacity of up to 800 MPa.

The HPI B3000 software previously performs a check of the drift present in the measurement chain by measuring the charge with the depressurized cylinder. According to the manufacturer, the drift related to the charge amplifier is less than 0.05 pC/s [25]. In the verification, it is indicated that the drift obtained in 2 s is less than 1 pC. If the value is higher, it is recommended to replace the cables connecting the transducer with the charge amplifier or even clean and dry the connectors [28].

From there, the system can start the calibration process, initiating the pressurization of the cylinder. The HPI B3000, from an estimate determined by the volume of the cylinder and the displacement of the piston performed by the step motor, determines the approximate pressure developing in the process. With this, it also verifies whether the pressure measured by the reference transducer is equivalent to the pressure estimated by the software. If there is no match, the software indicates failure in the process, which can be attributed to the high drift, the existence of air bubbles in the system or oil leakage, and the bleeding procedure should be performed according to the user manual in the last two cases [25].

At the end of the calibration process, the software, from the pressure determined by the reference transducer, determines the sensitivity of the transducer being calibrated, its calibration table with the predetermined pressures and the electric charge measurements, the sensitivity determined by the angular coefficient of the curve fitting and the linearity error obtained. Fig. 5 shows the HPI B630, highlighting the installation events of the two transducers in the hydraulic cylinder, and illustrates the curves of pressure and electrical charge measurements generated in the IQsC process.



Fig. 5: (1) Installation events of the two transducers on the hydraulic cylinder: (a) reference transducer and; (b) transducer under calibration. (11) Pressure and charge chart at IQsC process: (a) pressure measured by the reference transducer and; (b) electric charge measured by the transducer under calibration [25].

# 3.2. Indirect Dynamic Calibration (IDC)

S.2. Indiffer Dynamic curror function (DC) For calibration with the use of TMS K9905D, illustrated in Fig. 6, the IDC method is performed by means of manual pressurization of the hydraulic cylinder, that is, the operator must turn the wheel until the digital panel indicates the desired pressure for calibration. The reference pressure is measured by means of a Viatran 345EGSPW pressure transmitter. At the instant the pressure is obtained, the operator must open the dump valve quickly, characterizing the negative step, at the instant when the maximum electrical charge originated by the piezoelectric transducer in calibration is measured by the charge amplifier and the A/D converter.



In the case of the TMS K9905D, there is no fault-checking process in the calibration system. Thus, unless there is a procedure to check for such failures, the measurements of electric charge and pressure are subject to inaccuracies related to the possibility of high drift and air bubbles or leaks in the hydraulic system. According to the manufacturer, the drift related to the charge amplifier is less than 0.03 pC/s [24]. illustrates the TMS K9905D calibration system.

At the end of the procedure, the pressures and the corresponding maximum electrical charges are used to calculate the sensitivity by means of the angular coefficient of the fitted curve and the linearity error is determined.

#### 4. Results

Calibrations were performed with three different transducers using the two calibration methods previously described. Table 1 shows the serial numbers of the transducers used.

Table 1: Transducers used in the evaluation of calibration methods.
Model HDI CD6

	mouti	1111010	
Serial number	6336	6795	6931
Original sensitivity	33.00 pC/MPa	33.84 pC/MPa	34.04 pC/MPa

The results of the calibrations of the transducers using the IQsC and IDC methods allowed to determine not only the sensitivity, the deviation from the original sensitivity and the linearity error necessary for the classification of the transducers regarding the lifetime, but also the uncertainty of the least squares curve fitting  $u_{fit}$  and the standard uncertainty of the calculated sensitivity  $u_d$ , which were determined according to the following expressions:

$$u_{fit} = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} [P_i - P(q_i)]^2}$$
(4)

$$u_d = \sqrt{\frac{u_{fit}^2}{\sum_{i=1}^n q_i^2}}$$
(5)

where *n* represents the number of measurements,  $P_i$  is the pressure corresponding to the level, *i* and the pressure  $P(q_i)$  is calculated by means of the expression obtained by the curve fitting for the charge  $q_i$ .

#### 4.1. Results for Indirect Quasi-static Calibration (IQsC)

Using the methodology presented in section 3.1, the three transducers were calibrated with the IQsC method. Charge measurements were performed at 5 (five) pressure levels: 50 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa and 400 MPa. For each level, five replicates were obtained. Table 2 shows the results obtained.

Table 2: Results for calibration by IQsC.										
Transducer	6336	6795	6931							
Sensitivity	32.169 pC/MPa	33.727 pC/MPa	34.183 pC/MPa							
Deviation from original sensitivity	2.52 %	0.33 %	0.42 %							
Maximum linearity error	-0.10 %	-0.43 %	-0.13 %							
Uncertainty of fit (u <sub>fit</sub> )	21.66 pC	46.93 pC	45.29 pC							
Standard uncertainty of sensitivity (u <sub>d</sub> )	0.0176 pC/MPa	0.0382 pC/MPa	0.0378 pC/MPa							

Through the results, it is clear that the transducers would be approved by the criteria established by the normative basis. The GP6 6336 transducer, despite having a greater deviation from the original sensitivity, shows less linearity error and less uncertainty than the others.

4.2. Results for Indirect Dynamic Calibration (IDC)

Using the method described in section 3.2, the transducers were calibrated at 8 (eight) pressure levels, ranging from 50 MPa to 400 MPa, with two replicates at each pressure level. Table 3 presents the results for each transducer.

Table 3	: Results for calibration by			
Transducer	6336	6795	6931	
Sensitivity	33.063 pC/MPa	33.888 pC/MPa	34.475 pC/MPa	
Deviation from original sensitivity	0.19 %	0.14 %	1.28 %	
Maximum linearity error	3.46 %	-3.20 %	5.13 %	
Uncertainty of fit (u <sub>fit</sub> )	228.35 pC	250.43 pC	213.99 pC	
Standard uncertainty of sensitivity $(u_d)$	0,2261 pC/MPa	0,2473 pC/MPa	0,2113 pC/MPa	

From the results obtained, it is clear that, according to the IDC method, since the linearity error obtained was higher than the limit determined by the normative base ( $\pm 1$  %), the three calibrated transducers would be failed. It is also noted that the uncertainties of the curve fitting  $u_{fit}$  and of the sensitivity  $u_d$  present values higher than those obtained with the IQsC method.

The calibration curves of the three transducers determined by the IQsC and IDC methods are shown in Fig. 7.





The graph in Fig. 9 shows the linearity errors obtained for each calibration point according to the IDC method. It is observed that for all transducers, there are at least 4 (four) points with linearity error greater than  $\pm 1$  %.



Fig. 9: Linearity error for each pressure measurement in IDC.

# 5. Conclusion

This study presented the evaluation of two distinct methods of calibration of piezoelectric transducers used in ballistics tests: the IQsC and the IDC. In both procedures, commercial equipment was used, the HPI B630 and the TMS K9905D, both intended for the indirect calibration of these transducers. In the process of conformity assessment of ammunition, the calibration of piezoelectric transducers has a fundamental participation since it will determine the sensitivity of the instrument, that is, the relationship of pressure with the electric charge measured employing the dynamic pressure measurement chain, detailed in Fig. 1, in addition to providing data necessary for the classification of the transducer as to the lifetime by means of the linearity error and the deviation from the original sensitivity.

In a superficial analysis, it is important to emphasize that the cause of the transducer's rejection should not be imputed to the method employed. As highlighted in section 3.2, the TMS K9905D equipment is not automated, but is run manually by the operator. In addition, there is no checking procedure for drift in the measuring chain and leakage or air bubbles in the hydraulic system. Probably, such aspects may be directly related to the greater uncertainty obtained with the IDC method compared to the IQsC method.

The IQsC method used in the HPI B630 has an automated drift and hydraulic system verification procedure, and pressurization is performed by a software-controlled motor, reducing the operator's influence on calibration. Although the latter presents smaller uncertainties, in this case it is not possible to determine which procedure is correct. Since the equipment does not have the proper calibration, that is, within the deadlines determined by the respective manufacturers and by the normative basis of ballistics tests, it would not be possible to guarantee that any of the calibrations carried out could be adopted by a laboratory accredited by ISO/IEC 17025:2017.

Given the results, the main issue to be solved is reducing the risk of undue rejection of transducers or their inappropriate use in ballistics tests. The undue rejection can generate an increase in the costs of the laboratory with the imposition of the acquisition of new piezoelectric transducers. Improper approval may mean using a transducer with improper functioning, that is, with linearity error higher than the limit determined by the normative basis, or even the use of inadequate sensitivity, inserting a large portion of systematic error in the dynamic pressure measurements.

To reduce such risks, it would be useful to adopt transducer checking procedures. ISO/IEC 17025:2017 requires testing laboratories to check if it is "necessary to maintain confidence in the performance of the equipment" [27]. In the verification of charge amplifiers, it is possible to use standard signal generators as reference material [22].

For the piezoelectric transducers, as there is no dynamic pressure reference standard, the issue could be solved by comparing it with another measurement method accepted by NATO and the CIP. In this context, it can be suggested the measurement of pressure by means of copper crushers, a technique in which copper cylinders are used to determine the maximum pressure developed in the burning of the propelling charge of ammunition [3,29–32]. The cylinders are compressed by a piston that moves as the internal pressure rises. From the final length of the copper cylinder, the maximum pressure is determined by conversion tables corresponding to the copper cylinder used. Simultaneous measurement by means of copper crusher and piezoelectric transducers can be a way to verify the reliability of piezoelectric transducer calibrations. This possibility can be researched in future studies.

# Acknowledgements

The authors thank for the financial support provided by the Brazilian funding agencies CNPq, FINEP and FAPERJ. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior (Capes) - Finance Code 001. The CAEx (Centro de Avaliações do Exército) is sincerely thanked for their valuable support in the experiments and collaborations conducted during the production of this scientific article.

# 6. References

- Hjelmgren J. Dynamic measurement of pressure. A literature survey 2002.
- [2] Elkarous L, Nasri A, Nasri R. Numerical modeling and analysis of the pressure pulses generator for the dynamic calibration of high-pressure transducers. Applied Acoustics 2019;147:56–63. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.015.
- [3] Vlhova J, Vitek R. The analysis of 7.62 mm × 39 ammunition ballistic pressure measurement results by a pressure gauge and a piezoelectric transducer. 2021 International Conference on Military Technologies (ICMT), Brno, Czech Republic: IEEE; 2021, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICMT52455.2021.9502774.
- [4] Carlucci DE, Jacobson SS. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. CRC Press; 2018.
- [5] Eichstädt S, Esward T, Schäfer A. On the Necessity of Dynamic Calibration for Improved Traceability of Mechanical Quantities, 2015.
- [6] Salminen J, Högström R, Saxholm S, Lakka A, Riski K, Heinonen M. Development of a primary standard for dynamic pressure based on drop weight method covering a range of 10 MPa-400 MPa. Metrologia 2018;55:S52-9. https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa847.
- [7] ISO. ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 2017.

- [8] Theodoro FRF, Reis MLCDC, Souto C d'Andrade, Barros ED. Measurement uncertainty of a pressure sensor submitted to a step input. Measurement 2016;88:238-47. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.043.
- [9] NSO. AEP- 97: Multi-Calibre Manual of Proof And Inspection (M-CMOPI) For NATO Small Arms Ammunition. 2020.
- [10] CIP. Comprehensive Edition of Adopted C.I.P. Decisions. 2007.
- [11] SAAMI. Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Pistol and Revolver Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers (Z299.3). 2015.
- [12] Arnau A. Piezoelectric Transducers and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05361-4.
- [13] Watikins K. Force, Load and Weight Sensors. In: Wilson JS, editor. Sensors Technology Handbook, Newnes; 2005, p. 255-69.
- [14] AVL Gmbh. B3060-A01 Charge Amplifier Operational Instruction 1989.
- [15] Pallas A. Sensores and signal conditioning. John Wiley & Sons; 2012.
- [16] Zhao C, Kong D. Research on Sectional Nominal Mathematical Model of Piezoelectric Pressure Measurement System Based on Quasi-static Calibration. IEEE Trans Instrum Meas 2021:1-1. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3052013.
- [17] Webster JG. Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall/CRCnetBASE; 1999.
- [18] Jung WG, editor. Op Amp applications. Norwood, Mass: Analog Devices, Inc; 2002.
- [19] Oven R. Modified charge amplifier for stray immune capacitance measurements. IEEE Trans Instrum Meas 2014;63:1748-52. https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2298673.
- [20] Laurila M-M, Tokito S, Mantysalo M, Matsui H, Shiwaku R, Peltokangas M, et al. A fully printed ultra-thin charge amplifier for on-skin biosignal measurements. IEEE J Electron Devices Soc 2019;7:566-74. https://doi.org/10.1109/JEDS.2019.2915028.
- [21] Alnasser E. A novel low output offset voltage charge amplifier for piezoelectric sensors. IEEE Sensors J 2020;20:5360-7. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2970839.
- [22] Gautschi G. Piezoelectric Sensors. Piezoelectric Sensorics, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2002, p. 73-91.
- [23] Mack O. New procedures to characterize drift and non-linear effects of piezoelectric force sensors. Proceedings of the IMEKO TC3 Conference. Istanbul, Turkey, Citeseer; 2001.
- [24] PCB Piezotronics, Inc. Model 443B102 Dual Mode Modular Signal Conditioner Card Installation and Operating Manual 2021.
- [25] HPI Gmbh. Operation Instructions B630 Calibration Unit 2015.
- [26] The Modal Shop, Inc. Model K9905D High Pressure Sensor Calibration System User Manual 2016.
- [27] Inmetro. Orientações gerais sobre os requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 (DOQ-CGCRE-087) 2018.
- [28] Slanina O, Wynands R. Measurement uncertainty of a measurement system for dynamic pressure in the kbar regime. Meas Sci Technol 2021;32:075010. https://doi.org/10.1088/1361-6501/abe47e.
- [29] Zahid MZ, Butt SI, Iqbal T, Ejaz SZ, Faping Z. Nonlinear Material Behavior Analysis under High Compression Pressure in Dynamic Conditions. International Journal of Aerospace Engineering 2017;2017:1–15. https://doi.org/10.1155/2017/3616932.
- [30] Zhao CR, Kong DR, Wang F, Yang LX, Li LP. Research on the Pressure-Measuring Uncertainty of Standard Internal Crusher Gauge. AMM 2013;300–301:874–81. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.300-301.874.
- [31] Jussila J. Validation of piezoelectric measurement system for weapon firing pin percussion energy. Measurement 2010;43:415-20. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.12.011.
- [32] Wang, F, Li L, Kong D. Uncertainty Analysis of Chamber Pressure Measurement Based on Standard Copper Cylinder. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology 2016. https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.30.38.

# Anexo C – Tabela de conversão – *Copper crusher* Mileq 0905-VN1

	(		MIL Technolog	E(	<b>Q</b> Ltd	M #( 5( Si Er	illeg Tec )8-04 Mil ) Bukit B ngapore II: (+65) 68 nall: mail@	atok Stri 659578 96 6968 Mileq.com	es Pte L uilding aet 23 n Web: w	ita ww.mileq.t	com	
								Test a	ind issuant	ce certifica	te	
Tabelle Nr. 0905-VN1				Table number			Calculated by means of the compression curve established by the calibration labora					
Stauchk	Stauchkörpertyp 3 x 5 mm Stempel - Ø in mm 5		Crusher type Pistondiameter			0905-VN1 For the correctness:						
Stempe												
								MILE	Q Technno	ologies Pt	e. Ltd.	
DRUCK	- PRESS	SURE IN		BAR	STATIS	CH BEI 2	21° CEL.					
REM	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	D
MM												M
4,900												0,00
4,800												0,10
4,700	587	576	565	553	541	530	518	506		500		0,20
4,600	697	687	676	665	654	643	632	621	610	599	587	0,30
4,500	801	791	781	771	761	750	740	729	719	708	697	0,40
4,400	900	890	880	871	861	851	841	831	821	811	801	0,50
4,300	993	984	975	965	956	947	937	928	919	909	900	0,60
4,200	1.082	1.073	1.064	1.055	1.047	1.038	1.029	1.020	1.011	1.002	993	0,70
4,100	1.167	1.158	1.150	1.142	1.133	1.125	1.116	1.108	1.099	1.090	1.082	0,80
4,000	1.249	1.241	1.233	1.224	1.216	1.208	1.200	1.192	1.183	1.175	1.167	0,90
3,900	1.328	1.321	1.313	1.305	1.297	1.289	1.281	1.2/3	1.265	1.257	1.249	1,00
3,800	1.406	1.398	1.391	1.383	1.375	1.367	1.360	1.352	1.344	1.336	1.328	1,10
3,700	1.483	1.475	1.467	1.460	1.452	1.444	1.437	1.429	1.422	1.414	1.406	1,20
3,600	1.559	1.551	1.543	1.030	1.028	1.521	1.513	1.505	1.490	1.490	1.463	1,30
3,500	1.635	1.62/	1.019	1.012	1.004	1.097	1.009	1.001	1.574	1,000	1.009	1,40
3,400	1.711	1.704	1.090	1.000	1.000	1.073	1.000	1.007	1.000	1 710	1.000	1,50
3,300	1.709	1./01	1.774	1.700	1.730	1 820	1.821	1 813	1.805	1 797	1 780	1 70
3,200	1.009	1.001	1.000	1 097	1 018	1 010	1 902	1 894	1 885	1.877	1 869	1.80
3,000	2 037	2 020	2 020	2 011	2 003	1,994	1.986	1.977	1,969	1,960	1,952	1.90
2 900	2 197	2 118	2 109	2.100	2.091	2.082	2.073	2.064	2.055	2.046	2.037	2.00
2,800	2 221	2 211	2,202	2,192	2,183	2,173	2,164	2,155	2.145	2,136	2,127	2.10
2,000	6.661	the first of the second	ties in Vile	ter i Ula	2.100		and set 1	2.250	2.240	2.231	2.221	2,20
2,600												2,30
2.500												2,40
2,400												2,50
MM				_	_							M
			0.00	0.07	0.00	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	DE