

5 Conclusões

Como visto na Introdução, a medição dinâmica de pressão exerce um papel de fundamental importância nos mais variados campos da Engenharia, tais como pesquisas em aerodinâmica, biomecânica, motores de combustão interna e outros. No que tange, particularmente, às aplicações militares, manifesta-se a necessidade de medir as pressões desenvolvidas no interior de provetes¹⁵ no momento do tiro, para **Controle de Qualidade de lotes de munição**, bem como para o **desenvolvimento de novos armamentos**. Com esse propósito, são usados transdutores piezelétricos de alta pressão, os mais adequados para medição de cargas dinâmicas, como as que acontecem na balística interna¹⁶.

Devido às duras condições de uso, ocorrem mudanças na sensibilidade do transdutor durante sua vida útil. Dessa maneira, calibrações periódicas se fazem necessárias, a fim de assegurar confiabilidade à medição de pressão que se deseja implementar. Em face disso, é recomendado em norma que a sensibilidade do transdutor seja verificada em intervalos de 120 ± 20 tiros.

O problema objeto desta dissertação foi escolhido após pesquisa em que foi constatada a necessidade, tanto das Forças Armadas quanto da Indústria Bélica Nacional, de que se disponibilize no Brasil o serviço de calibração de transdutor piezelétrico de alta pressão. Oportuno observar que, atualmente, estas calibrações são feitas no exterior, a custos bastante significativos e em periodicidade superior à desejável.

Buscando solucionar o problema, esta dissertação, como sua principal contribuição, apresenta metodologia própria de calibração, ainda não disponível no País, utilizando como padrão um manômetro bourdon com classe de exatidão 0,5%, e como sistema de medição de tensão um osciloscópio digital acoplado a um amplificador de carga. Para cada pressão de referência, foram realizados vários experimentos, cujos resultados foram tratados estatisticamente para cálculo da tensão média equivalente, bem como para cálculo da incerteza dessa

¹⁵ Um provete de pressão é um tubo de teste no qual são instalados transdutores piezelétricos para medição da pressão, quando da realização do tiro. Os provetes têm espessura de parede bem maior que a de um tubo comum de arma.

¹⁶ Estudo científico dos processos que ocorrem no interior de uma arma de fogo, a partir do instante em que a queima do propelente é iniciada (FARRAR; LEEMING, 1983).

tensão. Foi utilizado neste trabalho um dispositivo experimental para variação do tempo de duração do evento, permitindo, assim, verificar o tempo-limite associado ao qual a resposta do transdutor mantinha-se livre de atenuação¹⁷, que representaria erro na medição de tensão. Para descarte dos experimentos cujos tempos de duração superavam o referido tempo-limite, foi criado e utilizado um critério a que se deu o nome de *critério de atenuação óbvia*¹⁸, que se servia do gráfico do desvio padrão da tensão, como função do tempo de duração do evento. Finalmente, supondo-se que o conjunto de experimentos não descartados pelo primeiro critério pertencia a uma mesma população, pôde-se utilizar, para assegurar maior confiabilidade aos experimentos levados em conta no cálculo de cada tensão média equivalente, um segundo critério para rejeição de dados: o critério de Chauvenet¹⁹. Após descarte de experimentos por ambos os critérios, constatou-se a estabilização do desvio padrão da tensão, como função do tempo de duração do evento, estabilização esta que vem a comprovar que o referido descarte foi acertado. Por fim, de posse dos vários pontos²⁰ (tensão média equivalente, pressão de referência), foi encontrada a *melhor curva de ajuste* aos mesmos, pelo método dos mínimos quadrados, qual seja: $y=ax$, em que $a = 0,0955 \text{ bar/mV}$. A vantagem de se obter uma curva de calibração é que o comportamento do transdutor pode ser estimado em pontos não determinados experimentalmente, 290 bar, por exemplo. Outra vantagem é se obter a incerteza total de medição da pressão. Como resultado da análise da calibração do transdutor piezométrico, concluiu-se que a referida incerteza, obtida com esta metodologia e com os equipamentos utilizados, é de 2,3 % em relação à faixa de utilização.

O método experimental desenvolvido, não apenas mostrou-se tecnicamente viável e adequado às condições laboratoriais da faixa de pressão na qual foi validado (34,7 à 349,8 bar) como também se mostrou viável economicamente. A incerteza associada a esse método, *obviamente*, é maior que aquela obtida com uma balança de peso morto, que se baseia num método primário. Entretanto, se for utilizado um sistema de medição de tensão com melhor exatidão, a incerteza do método experimental desenvolvido *poderá ser diminuída*.

¹⁷ Como se sabe, a resposta do transdutor tende a ficar atenuada para experimentos com tempos de duração “maiores”, como se pode ver quantitativamente no item 4.5, Capítulo 4, e visualmente na Figura 14 do Capítulo 3.

¹⁸ Detalhadamente descrito no Capítulo 3, item 3.3

¹⁹ Detalhadamente descrito no Capítulo 2, item 2.4.5

²⁰ Pares ordenados.

Não obstante a faixa de pressão estudada ser baixa se comparada às pressões desenvolvidas na balística interna²¹, a simples substituição do gerador de pressão por outro de maior capacidade será suficiente para calibração numa faixa mais larga, *utilizando-se a mesma metodologia*. Dessa maneira, empreendeu-se ao projeto e fabricação de um equipamento *gerador de alta pressão transiente*, para simulação da pressão desenvolvida na balística interna. Esse equipamento, a que se denominou **Calibrador Dinâmico de Piezelétrico**²², se encontra em fase de testes e ajustes, e permitirá a calibração em toda a faixa de medição.

²¹ A faixa de medição dos transdutores piezelétricos utilizados em balística interna, normalmente, é de até 6000 bar.

²² Há mais detalhes a respeito do Calibrador, bem como do procedimento proposto para sua utilização, no Apêndice H.