

## 2 Fundamentos teóricos

Neste capítulo, são apresentados sucintamente os fundamentos teóricos sobre os quais está alicerçada esta dissertação, que abrangem as características do sistema de medição e do sistema-fonte, os métodos estatísticos utilizados, e o posicionamento da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) sobre calibração de transdutores.

### 2.1 Princípio de funcionamento e histórico dos transdutores piezelétricos

O efeito piezelétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880, e permaneceu como mera curiosidade até a década de 40 (KISTLER, 19\_\_). Ele consiste na propriedade de certos cristais, aqueles que não possuem um centro de simetria, de gerar carga elétrica quando submetidos a uma carga mecânica que varia com o tempo. Mas essa carga elétrica gerada, sinal de saída de um transdutor piezelétrico, era pequena demais<sup>3</sup> para ser medida com exatidão, mesmo se utilizando os amplificadores então disponíveis. Por isso, essa propriedade não teve nenhuma aplicação prática até o desenvolvimento dos amplificadores de carga de alta impedância de entrada, que possibilitaram aos engenheiros inferir a carga mecânica a partir do sinal elétrico amplificado. Na década de 50, tubos eletrômetros de qualidade razoável tornaram-se disponíveis e o efeito piezelétrico foi comercializado.

O princípio do amplificador de carga foi patenteado por W. P. Kistler em 1950 e ganhou importância prática na década de 60 (KISTLER, 19\_\_). A introdução do MOSFET<sup>4</sup> e o desenvolvimento de materiais altamente isolantes, tais como o PTFE<sup>5</sup> e o Kapton, melhoraram muito o desempenho e impulsionaram o uso dos sensores piezelétricos em praticamente todas as áreas da tecnologia moderna e da indústria, quais sejam:

- Aeroespacial: túneis de vento, tubos de choque, foguetes.

---

<sup>3</sup> Da ordem de picocoulombs.

<sup>4</sup> "Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor".

- Balística: combustão, explosão, detonação, distribuição da pressão acústica.
- Biomecânica: medida de força de múltiplas componentes em ortopedia, esportes, ergonomia, neurologia, cardiologia e reabilitação.
- Motores de combustão interna.
- Tecnologia de produção: comparação de materiais, medida da força cortante, vida útil da ferramenta, seleção da ferramenta certa da condição ótima de corte.
- Testes de materiais: testes de impacto e de vibração.
- Pneumática: medidas em sistemas de controle e elementos lógicos.
- Engenharia de reatores: reatores pressurizados à água, vibração etc.

Os cristais piezelétricos são transdutores elétricos ativos, pois um único sinal de entrada, originado do sistema-fonte, aquele que se quer medir, é suficiente para que o transdutor gere seu sinal de saída, que é elétrico. Um cristal piezelétrico produz um sinal elétrico de saída apenas quando experimenta uma mudança na carga a que está exposto. Por esta razão, um transdutor piezelétrico não é adequado para medição de carga estática, já que, nesse caso, não há mudança, no decorrer do tempo, da carga a que está sujeito.

Um transdutor piezelétrico consiste, essencialmente, de finas lâminas ou chapas, cortadas de maneira adequada em relação aos eixos do cristal, para dar a máxima resposta piezelétrica numa direção desejada, ao mesmo tempo com pouca ou nenhuma resposta em outras direções. Estas lâminas são arrumadas em uma pilha e, usualmente, são precedidas por uma mola. A coluna de quartzo assim formada gera um sinal elétrico da ordem de picocoulombs, que é diretamente proporcional à carga mecânica a que está submetida a coluna.

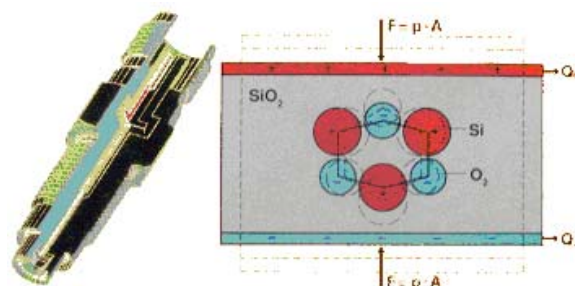


Figura 4 – Transdutor piezelétrico de pressão.

Fonte: Catálogo do fabricante AVL: “Static and Dynamic Calibration of Piezoelectric High-Pressure Transducers”

<sup>5</sup> Politetrafluoretileno.

## 2.2 Balística interna

De acordo com Farrar e Leeming (1983), balística interna é o estudo científico dos processos que ocorrem dentro de uma arma de fogo, desde o momento em que a queima do propelente é iniciada. A seguir, é descrita a “seqüência do tiro” na balística interna (Figuras 5 e 6), segundo os mesmos autores:

A “seqüência do tiro” é iniciada pela ignição do iniciador (“primer”, estopilha, cápsula). Os gases quentes resultantes dessa ignição iniciam, por sua vez, o propelente. À medida que a queima acontece, uma grande quantidade de gases é gerada naquele espaço confinado entre a câmara e o projétil, que praticamente veda a passagem de gases entre ele, projétil, e o tubo. Assim, os gases e a energia liberados pelo iniciador e pelo propelente não podem escapar: há um resultante aumento abrupto da pressão e da temperatura dentro da câmara. A taxa de queima do propelente é proporcional à pressão, por conseguinte, o aumento da pressão é acompanhado de aumento na taxa de produção de gases. O aumento de pressão é, então, minimizado pelo início do movimento do projétil ao longo do tubo da arma. A pressão na qual esse movimento se inicia é conhecida como pressão de “início de tiro”. O projétil encontrará então, quase que imediatamente, o raiamento do tubo e diminuirá de velocidade ou parará novamente até que a pressão tenha aumentado o suficiente para empurrá-lo ao longo da alma raiada do tubo. A cinta de forçamento ou a superfície do próprio projétil, dependendo do projeto, se amoldará à forma do raiamento, se a alma do tubo for raiada. A resistência, então, cai, permitindo que o projétil seja acelerado. À medida que o projétil se move para frente, ele é forçado a girar em torno do próprio eixo pelo raiamento e deixa para trás um volume adicional para ser preenchido pelos gases propelentes. O propelente ainda está queimando, produzindo gases de alta pressão tão rapidamente que o movimento do projétil não pode compensar totalmente: como resultado, a pressão continua subindo até que o pico de pressão é atingido, o que ocorre quando o projétil já tenha se movido cerca de um décimo do comprimento total do tubo da arma. O projétil continua a ser acelerado rapidamente e o espaço que ele vai deixando para trás passa a exceder a taxa de produção de gases de alta pressão e, então, a pressão começa a cair. O próximo estágio é a posição de “queima total”, na qual a queima do propelente é finalizada, pois todo o propelente já foi gasto. No

entanto, ainda há uma considerável pressão no tubo da arma, fazendo com que o projétil continue aumentando de velocidade durante seu movimento dentro do tubo. À medida que ele se aproxima da saída do tubo (boca do tubo), os gases propelentes se expandem, a pressão cai e a aceleração diminui. No momento em que o projétil deixa a arma, a pressão estará reduzida a cerca de um sexto do pico de pressão. O fluxo de gases, seguindo o projétil já fora da boca do tubo, implementa nele uma aceleração adicional por uma curta distância. Assim, a completa velocidade de boca do projétil só é atingida quando o mesmo está a alguma distância além da boca. Depois disso, o projétil fica logo livre da influência dos gases propelentes e continua sua trajetória, sendo levemente desacelerado pela resistência do ar.

A seqüência inteira do tiro, desde a ignição do iniciador até a saída do tubo, ocorre tipicamente em cerca de 15 ms. Para uma arma de porte, a seqüência pode levar menos de 1 ms, mas talvez leve cerca de 25 ms para um tubo grande de artilharia. Há uma curva real de tiro no Anexo E.

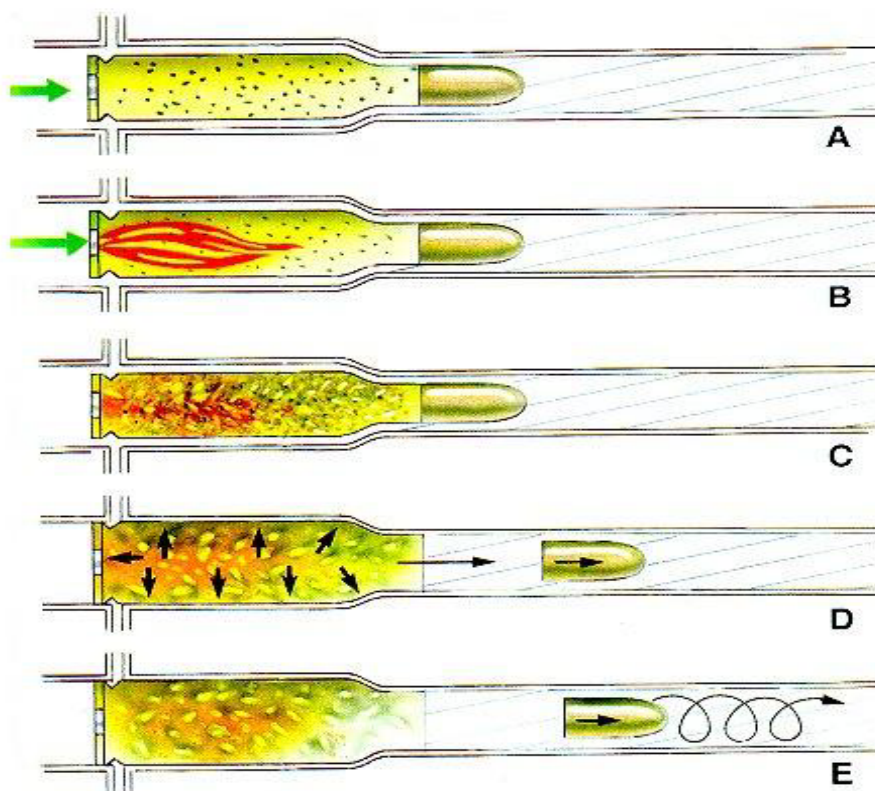


Figura 5 – “Seqüência de Tiro” da Balística Interna  
 Fonte: Apostila da Escola de Material Bélico (EsMB) do Exército

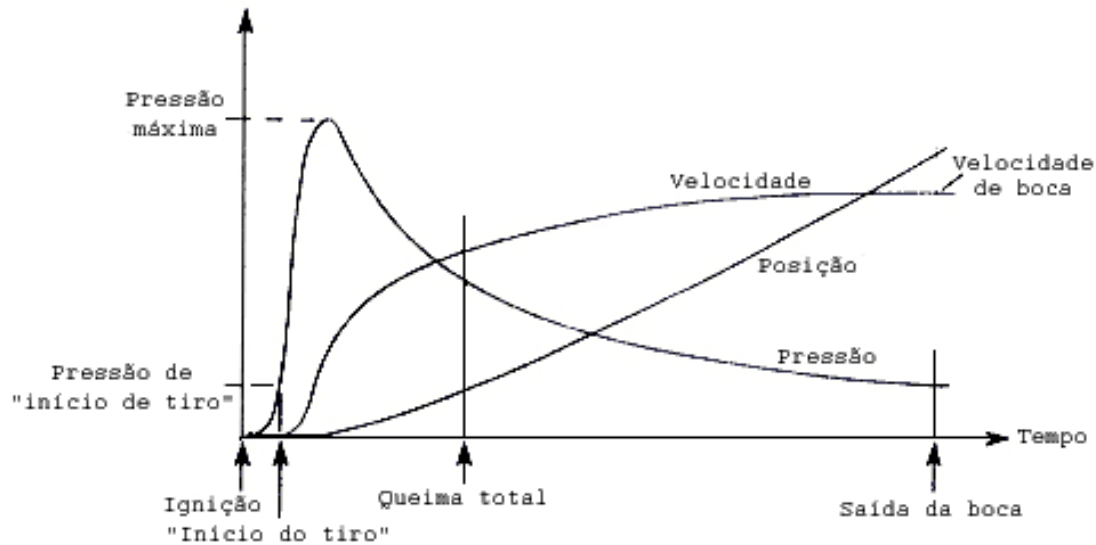


Figura 6 – Curvas típicas da Balística Interna: Pressão x Tempo, Velocidade x Tempo, e Posição x Tempo.

Fonte: Military ballistics, a basic manual (Farrar; Leeming).

## 2.3

### Adequação do Sistema de Medição utilizado

Como visto em 2.2, a seqüência inteira do tiro dificilmente tem tempo de duração inferior a 1 ms. Num provete (tubo de teste), que tem comprimento mais longo que o tubo de uma arma de porte, é muito pouco provável que o tempo de duração do evento da balística interna seja inferior a 1 ms, e se o for, ainda assim, esse tempo de duração será grande se comparado com o “rise time”<sup>6</sup> do sistema de medição utilizado. Esse sistema é composto de transdutor, amplificador de carga, e osciloscópio. O “rise time” de um transdutor piezelétrico (Anexo A) é, na pior das hipóteses, igual a 4  $\mu$ s, havendo transdutores com “rise time” de até 1,5  $\mu$ s, de acordo com catálogos dos fabricantes HPI e Kistler. O amplificador de carga foi projetado pela Kistler para amplificar sinal de saída de transdutor piezelétrico, portanto tem “rise time” compatível (Anexo B). Já o osciloscópio utilizado tem um “rise time” de 3,5 ns, de acordo com o manual do fabricante HP (Anexo C). Ele tem uma taxa de amostragem de 10 megaamostras por segundo, ou seja,  $10^7$  amostras em cada 1000ms, que é igual a  $10^7/10^3=10^4$  amostras em cada 1ms. Isto quer dizer que em 1ms o osciloscópio terá coletado 10 mil amostras.

Pode-se considerar, então, que o sistema de medição transdutor+amplificador+osciloscópio é muito mais “rápido” que o evento da

<sup>6</sup> Entende-se por “rise time” de um instrumento, o intervalo de tempo necessário para que o mesmo atinja um valor final, uma vez que um degrau foi aplicado como “input” (Orlando, 2004).

balística interna, cuja pressão ele se propõe a medir. Se isso não fosse verdade, o sistema de medição poderia acusar uma pressão aquém da pressão real. Como ele é muito mais rápido que o sistema-fonte<sup>7</sup>, pode-se considerar que ele efetua a medição quase que instantaneamente, não ocorrendo, dessa forma, atenuação significativa.



Figura 7 – Faixa de medição e de calibração dinâmica.  
Fonte: Catálogo do fabricante AVL: “Piezoelectric High Pressure Transducers”

## 2.4 Métodos estatísticos utilizados

Aqui são apresentados, de forma bem sucinta, apenas os métodos estatísticos que foram utilizados nesta dissertação, de acordo com o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (1998).

### 2.4.1 O valor que melhor representa o valor verdadeiro

Quando se mede o valor de uma grandeza  $X$  várias vezes, o valor que melhor representa o valor verdadeiro dessa grandeza é a média aritmética de todas as medidas encontradas. Deve-se notar que, quando a estimativa do valor verdadeiro da grandeza é tomada como a média aritmética, a soma dos quadrados dos desvios das medidas em relação a esta estimativa é um mínimo. Esse é essencialmente o princípio do Método dos Mínimos Quadrados (BENEDICT, 1984).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

<sup>7</sup> Aquela que se quer medir.

Nesta expressão,  $\bar{X}$  é a média aritmética;  $X_i$  é a  $i$ -ésima medição efetuada, e  $n$  é o número de medições efetuadas.

Se  $n \rightarrow \infty$ , então  $\bar{X} \rightarrow \mu$ , e  $\mu$  é a média verdadeira.

### 2.4.2

#### A incerteza padrão como medida da dispersão e o intervalo de confiança

A incerteza padrão  $u$  é equivalente a 1 (um) desvio padrão. O desvio padrão é a medida da dispersão dessa grandeza  $X$  em torno da média. Costuma-se chamá-lo de  $\sigma$ , e de  $s$  sua estimativa. Ele tem a mesma unidade de  $X$ . Para uma distribuição normal, 68,27% de todos os possíveis valores de  $X$  cairão dentro do intervalo  $\mu \pm \sigma$ , 95,45% cairão em  $\mu \pm 2\sigma$ , e 99,73% em  $\mu \pm 3\sigma$ .

As expressões matemáticas para cálculo de  $\sigma$  e de  $s$  são as seguintes:

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \right]^{1/2}, \quad n \rightarrow \infty. \quad (2)$$

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2}, \quad \text{para } n \text{ pequeno.} \quad (3)$$

Note que, na segunda expressão,  $n-1$  é usado ao invés de  $n$ . Isso é feito para compensar o fato de que a estimativa  $s$  sempre subestima  $\sigma$ . Mesmo assim, o valor estimado de  $\sigma$  continua subestimando o valor verdadeiro e isso é tanto mais evidente quanto menor é a amostra (BENEDICT, 1984).

Outro fato interessante é que se  $X$  é uma variável aleatória, a média de  $X$  é outra variável aleatória cujo desvio-padrão é igual ao desvio-padrão de  $X$  dividido por  $\sqrt{n}$ . Assim, temos:

$$\sigma_{\text{média}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

### 2.4.3 A distribuição t de “Student”

Reconhecendo a deficiência de o desvio-padrão amostral subestimar o desvio-padrão da população, um método foi desenvolvido pelo químico inglês W. S. Gosset em 1907, sob o pseudônimo “Student”, pelo qual intervalos de confiança poderiam ser obtidos a partir da estimativa  $s$  do desvio-padrão de uma simples amostra pequena (BENEDICT, 1984). Ele introduziu um fator de abrangência a que denominou de  $t_{v,p}$  de “Student” para ser multiplicado pela estimativa  $s$  e assim amenizar o efeito de subestimar o desvio-padrão  $\sigma$ . Este fator de abrangência, como se vê na Tabela 1, é função do número de graus de liberdade  $\nu$  e do nível de confiança desejado. O número de graus de liberdade pode ser definido, em geral, como o número de observações (medições efetuadas) menos o número de constantes calculadas a partir dos resultados dessas observações. No caso da estimativa  $s$  do desvio-padrão, a quantidade de constantes calculadas a partir dos dados é igual a 1 (um), porque a única constante calculada a partir das medidas é a estimativa da média.

Tabela 1 - Valores de t-student como função do número de graus de liberdade

$\nu = n - 1$ (Graus de liberdade)	Nível de confiança desejado		
	68,27 % ( $1\sigma$ )	95,45 % ( $2\sigma$ )	99,73 % ( $3\sigma$ )
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
6	1,09	2,52	4,90
7	1,08	2,43	4,53
8	1,07	2,37	4,28
9	1,06	2,32	4,09
10	1,05	2,28	3,96
15	1,03	2,18	3,59
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33
30	1,02	2,09	3,27
40	1,01	2,06	3,20
50	1,01	2,05	3,16
$\infty$	1,00	2,00	3,00

Fonte: Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição

$$X \pm t_{v,p} s \quad (5)$$

Para uma simples observação de  $X$ , a média verdadeira  $\mu$  terá uma probabilidade  $p$  de estar incluída no intervalo (5) acima.



#### 2.4.4 A propagação das incertezas

Se um resultado  $r$  é função da combinação de parâmetros, a incerteza desse resultado será função das incertezas desses parâmetros. Se esses parâmetros forem estatisticamente independentes e os coeficientes de sensibilidade iguais a 1 (um), situação mais comumente encontrada, então:

$$u_r^2 = \sum_{i=1}^J u_i^2 \quad (6)$$

Nesta expressão,  $J$  é o número de parâmetros.

Se os parâmetros forem estatisticamente independentes, mas com coeficientes de sensibilidade diferentes de 1:

$$u_r^2 = \sum_{i=1}^J (c_i u_i)^2 \quad (7)$$

Em (7)  $c_i = \frac{\partial r}{\partial u_i}$  é o coeficiente de sensibilidade. Observe que esta equação é mais abrangente que a imediatamente anterior.

A incerteza padrão combinada será depois expandida por um fator de abrangência  $k$  conveniente, e teremos, então, a incerteza combinada expandida:

$$U_r = k u_r \quad (8)$$

#### 2.4.5 O critério de Chauvenet para rejeição de leituras

É mesmo uma circunstância rara quando um cientista não acha que alguns dos dados obtidos parecem ruins e destoantes da maior parte dos dados. O cientista fica, portanto, diante da tarefa de decidir se esses dados são resultados de erros experimentais grosseiros ou se eles representam algum novo tipo de fenômeno físico que é peculiar a uma particular condição de operação. O cientista, engenheiro, ou pesquisador, não pode simplesmente

descartar esses “dados estranhos” apenas porque não se enquadram nas suas expectativas.

O Critério de Chauvenet (HOLMAN, 2001) especifica que uma leitura pode ser rejeitada, se a probabilidade de se obter um desvio particular da média estimada for menor que  $1/2n$ , em que  $n$  é o número de leituras realizadas. Ao aplicar o Critério de Chauvenet para eliminar dados duvidosos, primeiro se calcula a estimativa da média e do desvio-padrão usando todos os dados obtidos, inclusive os dados estranhos. Então, calcula-se o desvio de cada dado em relação à média e divide-se pela estimativa do desvio-padrão. Todo dado cujo valor do desvio assim obtido for pouco provável, ou seja, menos provável que  $1/2n$ , deverá ser rejeitado. Calcula-se, então, apenas com as leituras “aprovadas”, a nova estimativa da média e do desvio-padrão.

Foi elaborado um programa em linguagem Matlab para “rodar” o Critério de Chauvenet (Apêndice B). Esse programa proporcionou uma excelente economia de tempo.

Observe que o Critério de Chauvenet poderia ser aplicado uma segunda ou uma terceira vez para eliminar outros “dados estranhos”, mas esta prática é inaceitável, segundo Holman (2001), e deve-se aplicar o Critério apenas 1 vez.

#### **2.4.6 A distribuição de probabilidade retangular**

A distribuição de probabilidade retangular é utilizada quando há pouco conhecimento sobre a grandeza de entrada  $V$  e, por isso, deve-se agir com mais cautela, em favor da segurança. A incerteza padrão para uma distribuição retangular é obtida da seguinte forma:

$$u = \frac{V_{máx} - V_{mín}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Este valor de incerteza é muito maior que aquele que seria obtido se fosse considerada mais adequada a distribuição normal, ou mesmo a triangular. Sendo maior a incerteza obtida com a distribuição retangular, a probabilidade de o intervalo de confiança conter o valor verdadeiro também é maior. Portanto, a escolha da distribuição retangular é a mais segura quando há pouca informação sobre a grandeza que se quer medir.

### 2.4.7 As incertezas tipo A e tipo B

Uma incerteza padrão do tipo A é aquela que é determinada pelo tratamento estatístico de várias observações/medições repetidas, sob as mesmas condições.

Já uma incerteza padrão do tipo B é aquela avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis sobre a possível dispersão da variável aleatória. O conjunto de informações pode incluir dados de medições prévias, a experiência, o conhecimento geral do comportamento de instrumentos relevantes, propriedades de materiais, especificações do fabricante, dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados, incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais.

### 2.4.8 O método dos mínimos quadrados e a escolha da melhor curva de ajuste

O método dos mínimos quadrados é o método mais utilizado para ajuste de curvas a dados obtidos experimentalmente. Primeiro é preciso escolher a função que será usada para estimar valores a partir dos dados experimentais. Depois é fácil calcular os valores das incógnitas dessa função que minimizam a soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados (pela função) e os valores experimentais correspondentes. Matematicamente:

$$S = \sum_{i=1}^N (f^*(x_i) - f(x_i))^2 \quad (10)$$

$f^*(x_i)$  é o valor estimado pela função em  $x_i$ ,

$f(x_i)$  é o valor experimental correspondente,

$N$  é o número de dados experimentais.

Esses valores,  $f^*(x_i)$  e  $f(x_i)$ , devem ser bem próximos entre si, tanto quanto possível.

Para a escolha da melhor curva de ajuste, são usadas algumas funções diferentes como, por exemplo, uma função linear do tipo  $y = ax$ , outra do tipo  $y = ax + b$ , uma outra polinomial do 2º grau, uma outra do terceiro grau. Por

último, são calculadas as incertezas de ajuste para cada uma dessas funções, e é escolhida a curva cuja incerteza do ajuste é a menor de todas essas incertezas calculadas. Não é aconselhável experimentar um polinômio de grau maior que o terceiro. Há o risco de existir um polinômio de grau alto, 5º, por exemplo, cuja incerteza do ajuste seja bem pequena, mas que não represente bem os pontos experimentais. Ele pode passar perto de todos os pontos, mas com subidas e descidas e pontos de inflexão não coerentes com a tendência mostrada pelos resultados obtidos experimentalmente.

A expressão usada para calcular a incerteza do ajuste é a seguinte:

$$s^2 = \frac{1}{N-g} \sum_{i=1}^N (f^*(x_i) - f(x_i))^2 \quad (11)$$

Nesta expressão,  $g$  é o número de incógnitas da função  $f^*(x)$  a serem determinadas a partir dos  $N$  dados experimentais.

#### **2.4.9 Tipo de ajuste utilizado pelos fabricantes**

Um dado interessante sobre os fabricantes de transdutores piezelétricos de pressão é que eles escolhem como melhor curva de ajuste sempre uma reta passando pela origem. Talvez devido à experiência já adquirida a respeito de transdutores desse tipo, já se espere que os mesmos tenham sempre um comportamento bem linear, sendo uma reta do tipo  $y=ax$  a que melhor representa os dados experimentais. De fato, o manual NATO AC/225, como será visto a seguir, condena o transdutor que não apresente uma “linearidade aceitável”.

Outro dado interessante é que, para cada pressão esperada, é considerado que o transdutor tem uma sensibilidade diferente. Em outras palavras, o coeficiente angular de  $y=ax$  é função da pressão esperada, como se pode ver, na próxima página, na tabela do fabricante AVL, idêntica ao original, por isso em Inglês.

Tabela 2 – Especificações técnicas de transdutor da AVL

<b>AVL GRAZ-AUSTRIA</b>	
TYPE: <b>5QP6000T</b>	SN: <b>3102</b>
Measuring Range: <b>0...6000 bar</b>	
p (bar)	S (pC/bar)
500	2,29
1000	2,30
1500	2,31
2000	2,32
3000	2,33
4000	2,35
5000	2,37
6000	2,40
Sensitivity:	<b>2,38 pC/bar</b>
Linearity:	<b>0,9 % FSO</b>
Mounting Torque:	<b>10 Nm</b>
<b>Made in Austria by AVL</b>	

Tem-se uma noção da pressão esperada, a partir do tipo de munição que vai ser usada no tiro. Por exemplo, uma munição de 9 mm resultará numa pressão de cerca de tanto, e assim sucessivamente. Quando não se tem noção da “pressão esperada”, utiliza-se o valor médio, 2,38 pc/bar, no caso deste transdutor. Esse valor médio é obtido ajustando-se uma única reta (que passa pela origem) a todas as pressões de referência (coluna da esquerda da tabela).

Para se calcular a pressão, divide-se a carga gerada pelo transdutor pela sensibilidade.

#### **2.4.10** **O manual NATO AC/225<sup>8</sup>**

O teste de linearidade sugerido pelo manual NATO AC/225 recomenda que o transdutor seja submetido a quatro pontos de calibração de “baixa” pressão (35 MPa, 75 MPa, 105 MPa, e 140 MPa) e a cinco pontos de alta pressão (210 MPa, 250 MPa, 280 MPa, 350 MPa, e 410 MPa). Cada nível de pressão deve ser aplicado três vezes e os valores de leitura de carga obtidos

<sup>8</sup> NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. **Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition.** Section 23, Annex B: Piezoelectric pressure transducer, electronic instrumentation calibration procedures, Annex C: Pressure transducer qualification test, 1983.). Em português: Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN)

devem ser anotados. Pode-se usar o método estático de alívio rápido. Em seguida, basta seguir os passos:

- 1- Traçar um gráfico da Carga Média versus Pressão. A carga média para cada pressão de calibração deve ser registrada com a pressão correspondente. Isso resultará em nove pontos no gráfico: 4 de “baixa” pressão e 5 de alta;
- 2- Considerar separadamente dois grupos de dados: o de “baixa” e o de alta pressão;
- 3- Traçar duas retas de ajuste dos pontos, uma para cada grupo separadamente, ambas passando pela origem, ou seja, com coeficiente linear nulo, como mostra a Figura 8;
- 4- Construir, então, duas retas paralelas à reta de ajuste, uma 1% da faixa acima e a outra 1% abaixo. Fazer isso para cada grupo de dados. O transdutor terá linearidade aceitável se todos os pontos, em ambos os grupos, caírem dentro de sua respectiva faixa de erro. Mesmo que um único ponto de apenas um grupo caia fora de sua respectiva faixa de erro, o transdutor deve ser considerado como de “linearidade inaceitável”;
- 5- No caso de linearidade aceitável, o transdutor deve passar pelo chamado “teste de qualificação”.

Cada transdutor deve ter sua sensibilidade determinada em dois níveis de pressão, 75 MPa e 350 MPa; obtendo-se, então, duas sensibilidades diferentes, uma para cada nível de pressão. Uma vez determinadas as duas sensibilidades para cada transdutor, esses valores devem ser comparados com as sensibilidades obtidas na mais recente calibração de sensibilidade, que deve ter sido feita  $120 \pm 20$  tiros antes. No caso de transdutores novos, as sensibilidades devem ser comparadas com aquelas obtidas no teste de linearidade inicial. Se a mudança na sensibilidade em qualquer dos dois níveis de pressão for maior que 2% do prévio valor, ou maior que 10% da calibração original, o transdutor deve ser desqualificado e inaceitável para outros testes. Se o transdutor for aprovado neste teste de sensibilidade, então ele deve passar pelo último teste, o teste de tiro. Com o transdutor posicionado na “boca do estojo”<sup>9</sup>, e também nessa posição o transdutor de referência, utilizando-se a

---

<sup>9</sup> Entende-se por “boca do estojo” o início do tubo da arma, que coincide com a parte do estojo da qual o projétil se soltará, no momento do tiro. A “boca do estojo” é uma região do tubo onde ocorre alta pressão.

sensibilidade determinada a 350 MPa, deve-se efetuar 20 tiros com munições de referência. Esse teste deve ser repetido com os dois transdutores posicionados ao longo do tubo, utilizando-se a sensibilidade determinada a 75 MPa. Se a diferença de pressão encontrada acima em ambos os casos, “boca do estojo” e “ao longo do tubo”, for menor que  $\pm 10$  MPa, o transdutor deve ser qualificado pelo teste NATO. Caso contrário, o transdutor não deve ser qualificado.

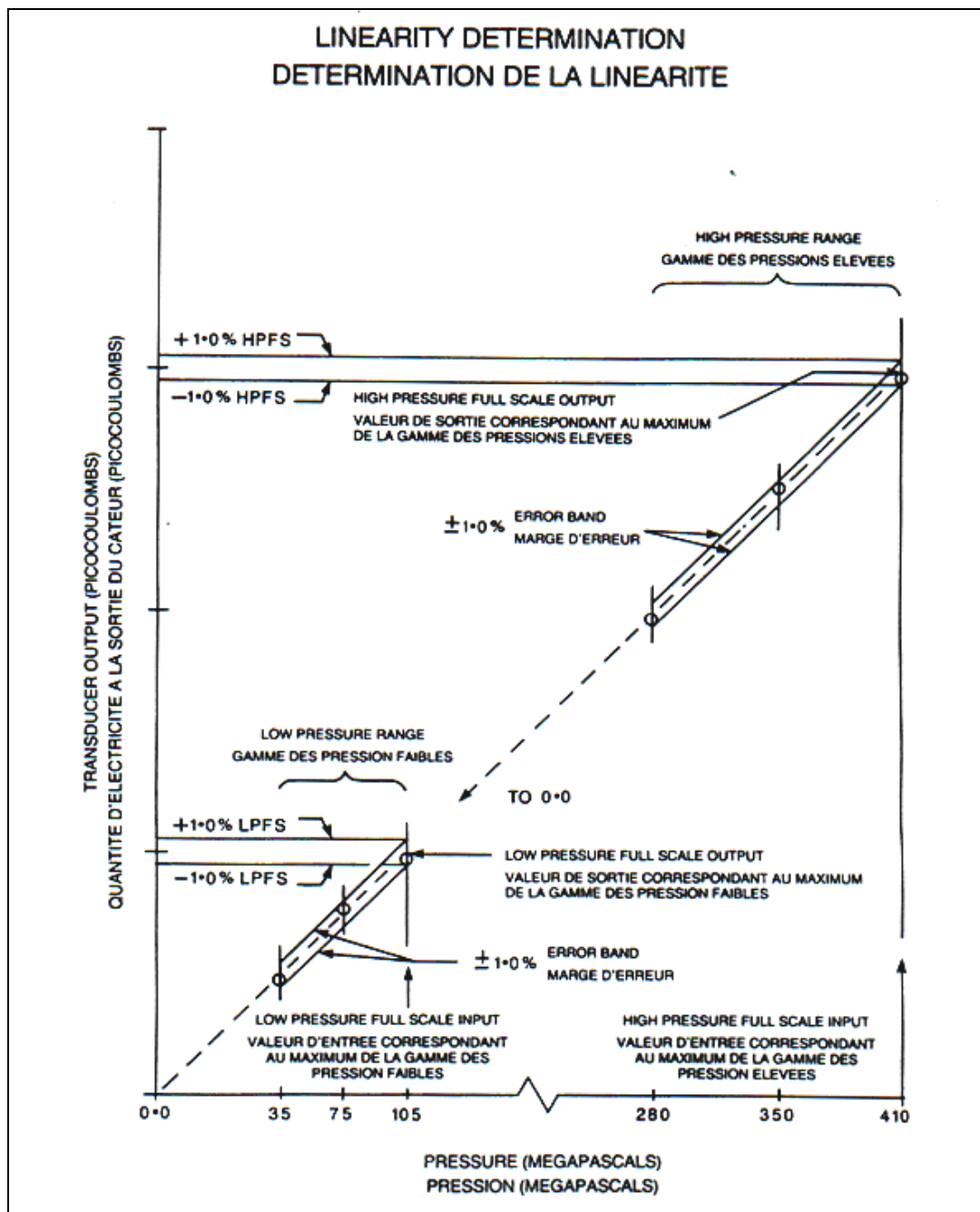


Figura 8 – Recomendação para realização do Teste de Linearidade  
Fonte: NATO AC/225, “Manual of proof and inspection procedures for NATO 5,56 mm ammunition”